

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra výrobních strojů a konstruování

Technická diagnostika ložisek ve firmě Siemens

Technical diagnostics of bearings at Siemens company

Student:

Bc. Marek Vaculín

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Jan Blata, Ph.D.

Ostrava 2016

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Marek Vaculín**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 72 Technická diagnostika, opravy a udržování
Téma: **Technická diagnostika ložisek ve firmě Siemens**
Technical Diagnostics of Bearings at Siemens Company
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Ložiska jsou jednou z nejdůležitějších a výrazně namáhaných konstrukčních částí strojních zařízení, proto je třeba jim věnovat patřičnou pozornost. Zabývejte se proto vhodnými metodami pro diagnostiku ložisek, proveďte potřebná měření, výsledky analyzujte a proveďte potřebné vyhodnocení získaných dat.

V rámci zadání zpracujte:

1. Rešerši a analýzu dané problematiky.
2. Ideově technický návrh řešení dané problematiky.
3. Zpracujte aplikaci na daný objekt.
4. Proveďte potřebná měření.
5. Proveďte konkrétní provozní vyhodnocení.

Podrobnější specifikaci zadání nebo jeho úpravy provede vedoucí práce nebo firma Siemens, s.r.o. odštěpný závod Elektromotory Frenštát.

Seznam doporučené odborné literatury:

JENČÍK, J. – VOLF, J. A KOL.: *Technická měření*. ČVUT v Praze 2003, 212 s., ISBN 80-01-02138-6

HELEBRANT, F. – ZIEGLER, J.: *Technická diagnostika a spolehlivost II – Vibrodiagnostika*. VŠB – TU Ostrava, Ostrava 2004, 1. vydání, 178 s., ISBN 80 – 248 – 0650 – 9.

TŮMA, J.: *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT*. Sdělovací technika Praha 1997, 174 s., ISBN 80-901936-1-7.

KREIDL, M., ŠMÍD, R.: *Technická diagnostika*. BEN – technická literatura, Praha 2006, 1.vydání, 408s., ISBN 80-7300-157-6

KREIDL, M. a kol.: *Diagnostické systémy*. ČVUT v Praze, Praha 2001, 352 s., ISBN 80-01-02349-4

Podkladové materiály - ADASH s.r.o., Brüel Kjaer, SKF Ložiska a.s.

ČSN 20 0065 *Metody měření a hodnocení mechanického kmitání-Mezní hodnoty kmitání*. Praha: Český normalizační institut, červen 1992. 16 s.

ČSN ISO 10 816 *Vibrace-Hodnocení vibrací strojů na základě měření na nerotujících částech*. Praha: Český normalizační institut, 1998.

ČSN 01 6910 *Úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovými editory*. Praha: Český normalizační institut, srpen 1997. 36 s.

ČSN ISO 690 *Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura*. Praha: Český normalizační institut, 1999. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Jan Blata, Ph.D.**

Datum zadání: 11.12.2015

Datum odevzdání: 16.05.2016



doc. Dr. Ing. Ladislav Kovář
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucí diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě...16.5.2016.....

..........

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucí diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním práce podle zákona č. 111/1998 Sb.- o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 16. 5. 2016


.....

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Marek Vaculín

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Valašské Meziříčí, Zdeňka Fibicha 1200

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

VACULÍN, M. *Technická diagnostika ložisek ve firmě Siemens*: diplomová práce. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra výrobních strojů a konstruování, 2016, 76 s. Vedoucí práce: Ing. Blata, J., Ph.D

Diplomová práce se zabývá diagnostikou ložisek ve společnosti Siemens, s.r.o., odštěpný závod Elektromotory Frenštát. Diplomová práce je rozdělena na dvě části a to na část teoretickou a praktickou. V teoretické části jsou vysvětleny základní pojmy týkající se dané problematiky. Dále jsou zde uvedeny metody, které se využívají pro diagnostiku technického stavu ložisek. V praktické části bylo pro potřeby této práce nasimulováno poškození určitých částí valivého ložiska. Tato ložiska byla následně změřena a vyhodnocena pomocí vhodných diagnostických metod. Poté bylo provedeno porovnání použitých diagnostických metod.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

VACULÍN, M. *Technical diagnostics of bearings at Siemens company*: Master thesis. Ostrava: VŠB - Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of production machines and design, 2016, 76 p. Thesis head: Ing. Blata, J., Ph.D

The thesis deals with the diagnosis of bearings at Siemens s.r.o ., branch Electric Frenštát. The thesis is divided into two parts, theoretical and practical. The theoretical part explains the basic concepts related to the issue. Furthermore, there are methods that are used for diagnostics of the technical condition of the bearings. In the practical part for the purposes of this study simulated damage to certain parts of the rolling bearing. These deposits were then measured and evaluated using appropriate diagnostic methods. Then, a comparison was made of the diagnostic methods.

OBSAH


SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ	9
-----------------------------------------	---

ÚVOD.....	11
-----------	----

1 Konstrukce ložisek	12
1.1 Rozdělení ložisek	12
1.1.1 Rozdělení kluzných ložisek	12
1.1.2 Rozdělení valivých ložisek	13
1.2 Valivá ložiska	14
1.3 Dynamické a statické zatížení.....	15
1.4 Základní dynamická únosnost	16
1.5 Mazání valivých ložisek.....	16
1.5.1 Mazání plastickým mazivem.....	17
1.5.2 Mazání olejem	18
1.6 Vibrodiagnostika	19
1.6.1 Základní vztahy	19
1.6.2 Základní měřené veličiny.....	21
1.6.3 Snímače vibrací.....	22
1.6.3.1 Snímače výchylky	23
1.6.3.2 Snímače rychlosti	23
1.6.3.3 Snímače zrychlení	24
1.6.4 Umísťování snímačů, provozní pokyny.....	25
1.6.5 Diagnostika valivých ložisek	27
1.6.6 Alternativní metody ke zjištění technického stavu valivých ložisek	32
1.6.6.1 Metoda obálkové analýzy.....	32
1.6.6.2 Metoda SPM (Shock pulse meter).....	33
1.6.6.3 Metoda BCU	34
1.6.6.4 Crest faktor	35
1.6.6.5 Metoda SEE	36
1.6.6.7 Kurtosis faktor	37
2 Charakteristika společnosti Siemens s.r.o	38
2.1 Použité měřicí přístroje	41
2.2 Postup měření.....	42
2.3 Hodnocení zrychlení vibrací podle normy.....	45

2.4	<i>Hodnocení vibrací podle metody SPM dBm/dBc.....</i>	46
2.5	<i>Vyhodnocení ložiska s poškozením vnitřního kroužku.....</i>	47
2.6	<i>Vyhodnocení ložiska s poškozenou vnějšího kroužku.....</i>	48
2.7	<i>Vyhodnocení ložiska s poškozením vlivem nečistot v mazivu.....</i>	49
2.8	<i>Vyhodnocení ložiska s poškozenou kuličkou.....</i>	45
2.9	<i>Vyhodnocení ložiska s poškozením z provozu.....</i>	46
ZÁVĚR		53
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		54
SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ		56
SEZNAM PŘÍLOH.....		57

SEZNAM POUŽITÝCH ZNAČEK A SYMBOLŮ

a	Zrychlení	[mm.s ⁻²]
A _{max}	Maximální zrychlení – amplituda zrychlení	[mm.s ⁻²]
BCU	Bearing Condition Unit	[-]
B _d	Průměr valivého tělesa	[mm]
C	Základní dynamická únosnost	[kN]
f	Frekvence	[Hz]
FFT	Rychlá Fourierova Transformace	[-]
φ	Kontaktní úhel	[°]
g	Gravitační zrychlení	[m/s ²]
HF	High Frequency Emision – metoda ke zjištění stavu ložisek	[-]
L ₁₀	Základní trvanlivost ložisek	[10 ⁶ ot]
n	Počet valivých prvků	[-]
	Směrodatná nebo efektivní odchylka vůči nulovému signálu	[mm]
p	Mocnitel pro kuličková ložiska	[-]
P	Ekvivalentní dynamické zatížení ložiska	[kN]
P _d	Střední průměr ložiska	[mm]
P _x	Pravděpodobnost (x)	[-]
RMS	Efektivní hodnota	[-]
RPM	Otáčky hřídele	[-]
SEE	Spectral Emited Energy – metoda ke zjištění stavu ložisek	[-]
SPM	Shock Pulse Meter – metoda ke zjištění stavu ložisek	[-]
T	Perioda	[s]
t	Čas	[s]
v	Rychlost	[mm.s ⁻¹]
v _{max}	Maximální rychlost – amplituda rychlosti	[mm.s ⁻¹]
x	Okamžitá výchylka	[mm]
x _{max}	Maximální výchylka	[mm]
x _{ave}	Střední absolutní hodnota	[mm]

x_{rms}	Střední kvadratická hodnota	[mm]
\bar{x}	Střední hodnota signálu	[-]
ω	Úhlová rychlost	[rad.s ⁻¹]

ÚVOD

V dnešní době se ložiska vyskytují prakticky všude, kde se podíváme. Můžeme je najít v dopravních prostředcích, ve vybavení pro sportovní potřeby, v elektrospotřebičích, dokonce také v hračkách pro děti. Je pochopitelné, že spotřebitelé, které tyto věci kupují očekávají vysokou kvalitu, dlouhou životnost při minimálních požadavcích na údržbu. Všechny tyto požadavky jsou velice úzce spjaty s ložisky, které tvoří důležitou součást většiny zařízení. Vysoké nároky jsou proto kladeny i na ložiska, jejichž vývoj postupuje neustále vpřed, aby bylo možné dosáhnout vyšší trvanlivosti, lepších provozních vlastností a zároveň menších nákladů na provoz a údržbu.

Do vývoje je proto vkládáno mnoho úsilí i financí, abychom byli schopni lépe porozumět dějům, které vznikají při kontaktu dvou valivých těles a předvídat jejich chování za provozu. Na valivá ložiska působí za provozu mnoho faktorů, které nepříznivě ovlivňují jejich životnost a způsobují vznik různých mechanických poškození. Snahou je tedy toto poškození co nejvíce minimalizovat.

Jednou z mnoha metod, jak předejít poškození ložiska je výpočet intervalu, ve kterém by mělo být ložisko vyměněno. Tato metoda však není příliš efektivní, protože za provozu na ložisko působí vždy více nepříznivých vlivů, než je zahrnuto ve výpočtech. Poškození ložiska může nastat dříve, než bylo vypočteno, což může mít za následek havárii celého stroje. Další metodou, jak předejít poškození ložiska je vizuální kontrola stavu ložiska. Tato metoda však vyžaduje rozebrání stroje, což v praxi není reálné. Hlavní směr hodnocení technického stavu valivých ložisek se vydává směrem bezdemontážní a nedestruktivní diagnostiky. Pomocí této metody je možné odhalit poškození ložiska, lokalizovat ho, zjistit rozsah poruchy a sledovat jeho vývoj.

Technická diagnostika je nástrojem údržby, pomocí jejichž aplikace můžeme předcházet haváriím stroje. Hlavním sledovaným parametrem jsou vibrace ložiska. Ty se v průběhu životního cyklu mění. Při rozvoji poruchy dochází k exponenciálnímu nárůstu vibrací. Vibrace buzené poškozením ložiska slouží k bezdemontážní diagnostice ložisek. V průmyslu se diagnostika ložisek využívá k určení zbytkové životnosti ložiska a tato hodnota je následně využita při plánování servisu strojů a zařízení. Pomocí diagnostiky minimalizujeme odstávky stroje způsobené haváriemi ložisek.

1 Konstrukce ložisek

Ložisko je součást technického zařízení, která drží čep v požadované poloze, zmenšuje tření při vzájemném pohybu strojních součástí a zachycuje a přenáší jeho zatížení. Podle zatížení, rozeznáváme ložiska radiální – zachycují sílu působící kolmo na osu a axiální – zachycují sílu působící ve směru osy. Nejzákladnější dělení ložisek je podle druhu tření vznikajícího za provozu. Podle toho dělíme ložiska na kluzná a valivá.

Přeměnu suchého tření na kapalinné dosáhneme tak, že mezi pohybující se stykové plochy přivedeme odpovídající žádoucí maziva. Ložiska, která využívají tento princip se nazývají kluzná. Vložíme-li mezi ložisko a hřídel další člen – valivé těleso např. kuličku, mluvíme o ložisku valivém.

Kluzná ložiska se skládají z čepu a pouzdra, při čemž prostor mezi čepem a pouzdrém je vyplněn mazivem nebo kapalinou, které snižují tření rotujících součástí. Kluzná ložiska se používají ve strojích s větším zatížením s rázy, u kterých hrozí možnost přetížení. Mají klidný a tichý chod. Jsou také vhodná tam, kde se nevyžaduje mazání. Mají jednoduchou konstrukci a díky tomu je snadná jejich montáž a demontáž. Na druhou stranu mají větší ztráty, nižší účinnost a kladou větší nároky na údržbu. [16]

1.1 Rozdělení ložisek

1.1.1 Rozdělení kluzných ložisek

1. Podle působení zatížení

- Radiální
- Axiální
- Kombinovaná
- Posuvná vedení

2. Podle časového průběhu síly nebo rychlosti rozeznávám kluzná ložiska

- Zatížená staticky
- Zatížená dynamicky

3. Podle smyslu otáčení

- Jednosměrná
- Obousměrná

1.1.2 Rozdělení valivých ložisek

1. Podle působení zatížení

- Radiální
- Axiální
- Kombinované
- Momentové

2. Podle počtu řad valivých elementů

- Jednořadá
- Dvouřadá
- Víceřadá

3. Podle možnosti nakládění

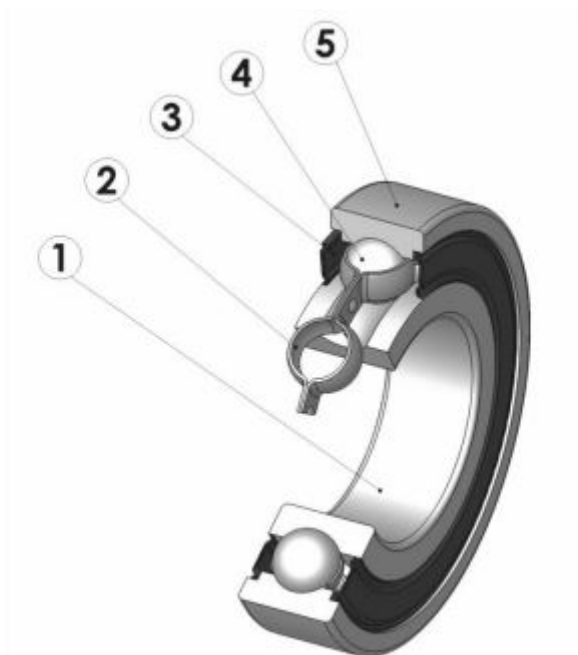
- Pevná
- Naklápěcí

4. Podle tvaru valivých elementů

- Kuličkové
- Válečkové
- Kuželíkové
- Jehlové
- Soudečkové

1.2 Valivá ložiska

Principem valivých ložisek je převod smykového tření na valivé, a to prostřednictvím valivých elementů. Valivé ložisko je složeno z vnitřního a vnějšího kroužku, valivých elementů a klece (viz. Obrázek 1). Tato konstrukce dovoluje vzájemné otáčení vnitřního i vnějšího kroužku. Vnitřní kroužek je nasazen na čep, vnější kroužek do rámu. Klec slouží k udržování valivých elementů v konstantní vzdálenosti a zabraňuje jejich vzájemnému kontaktu. U valivých ložisek jsou ztráty způsobeny valivým odporem, ten je však v porovnání s třením v kluzném ložisku výrazně menší.



Obrázek 1 *Kuličkové ložisko*, (1) - vnitřní kroužek, (2) - klec, (3) - těsnění, (4) - valivé tělísko, (5) - vnější kroužek [1]

Vnitřní, vnější kroužek a valivé elementy přenáší zatížení, proto musí být vyrobeny z kvalitních, pevných a tvrdých materiálů. Valivé tělesa a oběžné dráhy jsou zatíženy kontaktní únavou, tudíž se u nich klade velký důraz na tvrdost a jakost povrchu. Klec naopak přenáší jen velmi malou část zatížení, proto se ji snažíme vyrábět co možno nejlehčí, abychom snížili celkovou hmotnost ložiska. Klece bývají lisované z ocelového, popřípadě mosazného plechu. Dále se klece vyrábí například z mosazi, ocele, lehkých slitin nebo polymeru. [13]

Kuličková ložiska jsou nejpoužívanějším druhem valivých ložisek. Optimální velikost a počet valivých tělísek vede k dosažení dobrého přimknutí kuliček a oběžných drah, což způsobuje poměrně vysokou únosnost. Nejpoužívanějším druhem kuličkových ložisek jsou jednořadá kuličková ložiska, kuličková ložiska s kosoúhlým stykem a naklápěcí kuličková ložiska.

Válečková ložiska mají valivé těleso ve tvaru válce. Tato ložiska dosahují větší únosnosti v porovnání s kuličkovými ložisky a jsou vyráběna s vyšší přesností. Uplatňují se v provozech s vysokým zatížením, otáčky a rázy. Používají se například jako nápravová ložiska pro kolejová vozidla.

Kuželíková ložiska se vyznačují vysokou únosností v radiálním i axiálním směru. Vysokou únosnost v obou směrech umožňuje valivé těleso ve tvaru komolého kužele.

Soudečková ložiska mají tělesa ve tvaru válečku s kulovou oběžnou dráhou. Konstrukce soudečkových ložisek dovoluje vzájemné naklápění kroužků. Tato ložiska mohou pracovat při nesouososti nebo nevyvážení hřídele. [1]

1.3 Dynamické a statické zatížení

Dynamické a statické zatížení jsou jedny z hlavních parametrů, které slouží pro výpočet trvanlivosti ložiska. Na základě zatížení a požadované doby provozu zvolí konstruktér velikost a typ ložiska.

Mezní frekvence ložisek je pak závislá na typu, přesnosti, provedení klece, vnitřní vůle, způsobu mazání atd. Tyto zmíněné faktory způsobují vývin tepla v ložisku. Provozní teplota maziva stanovuje mezní frekvenci otáčení ložiska.

1.4 Základní dynamická únosnost

Základní dynamická únosnost **C** je používána pro výpočet trvanlivosti ložiska, které je dynamicky namáháno, tzn. ložiska, které se otáčí a je zatížené. Vyjadřuje zatížení, při němž ložisko dosáhne základní trvanlivosti, tj. 1 milion otáček podle ISO 281. Předpokládá se však, že zatížení má konstantní velikost a směr je pouze radiální pro ložiska radiální a čistě axiální v ose ložiska pro axiální ložiska. [2]

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P}\right)^p \quad (1.0)$$

$$\text{nebo} \quad \frac{C}{P} = (L_{10})^{\frac{1}{p}} \quad (1.1)$$

Legenda:

C [kN]	základní dynamická únosnost
L_{10} [10^6 ot]	základní trvanlivost
p [-]	mocnitel pro kuličková ložiska $p=3$, pro ložiska s čárovým stykem $p=10/3$
P [kN]	ekvivalentní dynamické zatížení ložiska

1.5 Mazání valivých ložisek

Hlavním účelem mazání ložisek je snížit tření a opotřebení v ložisku. V kontaktní oblasti mezi kroužky a valivými tělesy dochází k valení a prokluzu, jehož velikost závisí na druhu použitého ložiska, zatížení a druhu mazání ložiska. U valivých ložisek dochází za provozních podmínek tzv. elastohydrodynamické mazání, které se vyznačuje značným zvýšením tlaku v mazacím filmu uvnitř kontaktní oblasti.

Hlavní úlohy maziva jsou následující:

- Snížení tření a opotřebení. Přímému kontaktu kov na kov mezi ložiskovými kroužky je zabraňováno pomocí mazivového filmu, který snižuje tření a opotřebení v kontaktních oblastech.
- Prodloužení únavové životnosti. Únavové životnost ložiska je závislá především na viskozitě maziva a tloušťce mazivového filmu v kontaktních oblastech.
- Odvod tepla. Díky cirkulaci oleje dochází k odvodu přebytečného tepla nebo tepla z vnějšího prostředí z ložiska. Tím se ložisko chrání před přehřátím a olej před degradací.
- Ochrana povrchu ložiska před korozí.
- Zabránění vnikání nečistot do ložiska. Odvod cizích částic z ložiska díky cirkulaci oleje.

K mazání ložisek za běžných podmínek se používá olej nebo plastické mazivo. Ve zvláštních případech se používá pevné mazivo – například pro velmi vysoké teploty nebo provoz ve vakuu. Při rozhodování o druhu maziva a způsobu mazání je potřeba zohlednit provozní podmínky, charakteristické vlastnosti použitého maziva, konstrukci zařízení, atd. Mazání olejem umožňuje lepší mazací schopnosti, na druhou stranu mazání plastickými mazivy umožňuje snadnější použití v ložisku. [14]

1.5.1 Mazání plastickým mazivem

Za běžných provozních podmínek se obvykle používá mazání plastickým mazivem. Výhoda plastických maziv spočívá v lepším udržení maziva v uložení, v utěsnění uložení proti vniknutí nečistot a hlavně v jednoduché údržbě ložiska.



Obrázek 2 Použití plastického maziva [3]

Plastická maziva pro mazání valivých ložisek jsou nejčastěji vyráběna z jakostních minerálních nebo syntetických olejů, které se zahušťují kovovými mýdly mastných kyselin. Plastická maziva musí mít dobrou mazací schopnost, dále se musí vyznačovat vysokou chemickou, tepelnou a mechanickou stálostí. Plastická maziva mohou být obohacena o aditiva, která zvyšují provozní životnost maziva a ložiska. Při volbě maziva je nutné brát v potaz nejdůležitější vlastnosti maziva – např. jeho viskozitu základového oleje, konzistenci, únosnost, protikorozi vlastnosti, atd.

1.5.2 Mazání olejem

Mazání olejem se používá v případech, když je frekvence otáčení tak vysoká, že by domazávací období pro mazání plastickým mazivem bylo příliš krátké. Dalšími důvody může být potřeba odvodu tepla z ložiska, vysoká teplota prostředí, která nedovoluje použití plastického maziva nebo pokud jsou sousední části z konstrukčního hlediska již mazány olejem např. ozubená kola v převodovce.

Při mazání olejem musí být zaručený takový stav, aby bylo mazání zabezpečeno při rozběhu i během provozu. Nadměrné použití oleje zvyšuje jeho teplotu, a tím také teplotu ložiska. Přívod oleje do ložiska se zajišťuje různými konstrukčními způsoby:

- Mazání olejovou lázní – nejpoužívanější a nejjednodušší způsob olejového mazání pro nízké a střední frekvence otáčení. Hladina oleje sahá do výšky středu spodního valivého elementu a v této výšce musí být udržována. Olej je unášen rotujícími částmi ložiska a rozptylován v ložisku. Poté se vrací zpátky do olejové lázně.
- Mazání oběhem oleje – nejčastěji se používá pro provoz při vysokých otáčkách, kde je vyžadováno chlazení ložiska a pro provoz při vysokých provozních teplotách. Oběh oleje je uskutečněn pomocí čerpadla. Po průchodu oleje ložiskem se olej vrací zpět do nádrže, kde je přefiltrován a podle potřeby také ochlazen.
- Mazání rozstřikem oleje – olej je rozstřikován na ložisko rotujícím ozubeným kolem. Ložisko tak nemusí být ponořeno v olejové lázni. Tento způsoben je často využíván v převodovkách automobilů.

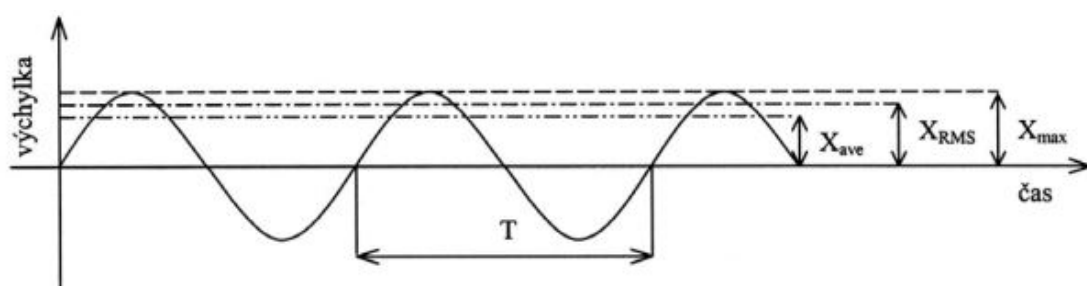
- Mazání olejovou mlhou – využívá se stříkání olejové mlhy do ložiska. Tento způsoben je využíván např. pro mazání vřetenových ložisek obráběcích center.

Pro mazání ložisek se ve většině případů používají rafinované oleje s dobrou chemickou stabilitou, která může být případně vylepšena antioxidačními přísadami. Pro mazání valivých ložisek se dává přednost čistým minerálním olejům bez přísad. Ty se používají jen v ojedinělých případech. Syntetické oleje se používají pouze pro náročné použití při velmi nízkých nebo velmi vysokých teplotách. [3]

1.6 Vibrodiagnostika

Je jednou z nejpoužívanějších metod pro diagnostiku technického stavu strojních zařízení. Pro vyhodnocování stavu využívá vibrační signál, který je dále zpracováván a analyzován. Pro měření a analýzu vibračního signálu využíváme rychlost, zrychlení a výchylku vibrací.

1.6.1 Základní vztahy



Obrázek 3 Příklad harmonického kmitání se znázorněním maximální amplitudy, střední kvadratické a absolutní hodnoty [4]

Okamžitá výchylka:

$$x = X_{max} \cdot \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = X_{max} \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) = X_{max} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad [\text{mm}] \quad (1.2)$$

Pro úpravu vzorce bylo použito:

- Frekvence kmitání:

$$f = \frac{1}{T} \quad [\text{Hz}] \quad (1.3)$$

- Úhlová rychlost:

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad [\text{rad.s}^{-1}] \quad (1.4)$$

- X_{\max} ... maximální výchylka – amplituda výchylky

Rychlost:

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega \cdot X_{\max} \cdot \cos(\omega \cdot t) = V_{\max} \cdot \sin\left(\omega \cdot t + \frac{\pi}{2}\right) \quad [\text{mm.s}^{-1}] \quad (1.5)$$

- kde V_{\max} je maximální rychlost, maximální amplituda rychlosti

Zrychlení:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega^2 \cdot X_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t) = -A_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t) = A_{\max} \cdot \sin(\omega \cdot t + \pi) \quad [\text{mm.s}^{-2}] \quad (1.6)$$

- kde A_{\max} je maximální zrychlení, maximální amplituda zrychlení

Střední absolutní hodnota výchylky:

$$x_{ave} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |x| \cdot dt \quad [\text{mm}] \quad (1.7)$$

Střední kvadratická hodnota výchylky (Efektivní hodnota – RMS):

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2 \cdot dt} \quad [\text{mm}] \quad (1.8)$$

Pro harmonický pohyb platí:

$$X_{RMS} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \cdot X_{ave} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot X_{MAX} \cong 0,707 \cdot X_{MAX} \quad [\text{mm}] \quad (1.9)$$

Některé výrazy, používající se často při měření vibrací:

- Efektivní hodnota – RMS (RootMeanSquare) je důležitá tím, že obsahuje informace o výkonu kmitání. Tato hodnota má původ v elektrotechnice, kde se používá jako porovnání mezi výkonem stejnosměrného a střídavého proudu.
- Špička (peak) je vzdálenost mezi vrcholem vlny a nulovou úrovní signálu.
- Špička – špička (peak – to – peak) je vzdálenost mezi nejnižším a nejvyšším vrcholem vlny ($2 \cdot X_{MAX}$)
- Průměrná hodnota (average), jelikož většina signálu nemá ideální sinusový průběh, je průměrná hodnota nenulová ($0,637 \cdot X_{MAX}$)
- Celkové vibrace (overall) je číslo, reprezentující množství energie obsažené v pásmu mezi dvěma frekvencemi. [4]

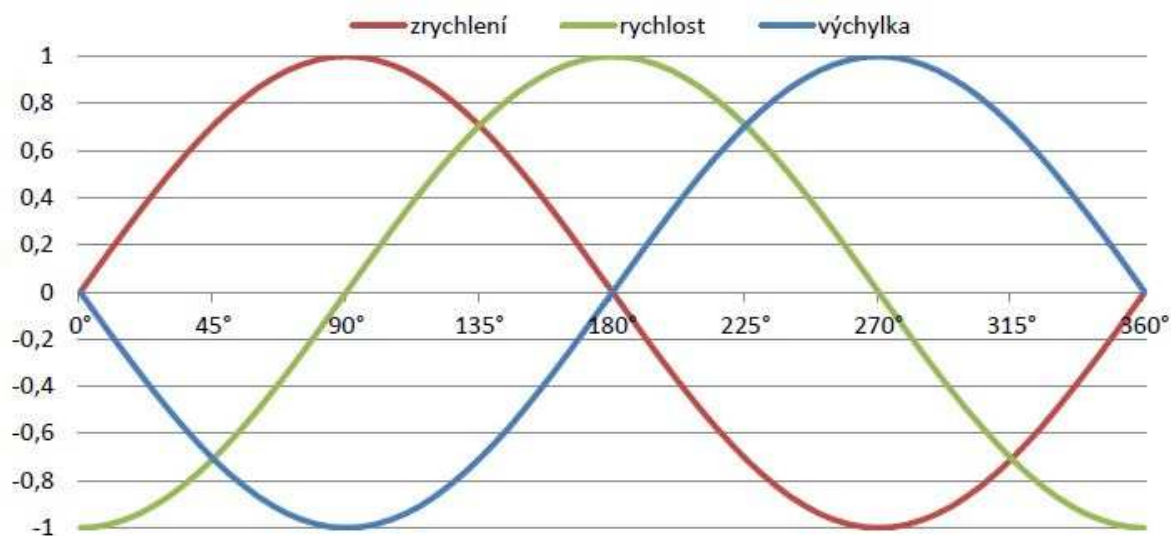
1.6.2 Základní měřené veličiny

Ve vibrodiagnostice jsou měřeny a vyhodnocovány podle nejrůznějších metod tři základní veličiny – rychlost, zrychlení a výchylka vibrací. Rychlost vibrací (mm/s) se využívá pro identifikaci poruch, které se projevují v nízkých nebo středních frekvencích, obvykle ve frekvenčním pásmu 10 – 1000 Hz. Mezi typické poruchy, pro které se využívá měření rychlosti vibrací patří např. nevývaha, nesouosost, uvolnění, atd.

Zrychlení vibrací je důležité pro včasnou identifikaci poruch, které se projevují ve vysokých frekvencích, zpravidla v jednotkách až desítkách kHz, kde se projevují počáteční problémy poruchy ložisek, převodů, mazání atd. Mluvíme-li o zrychlení, můžeme se velmi často setkat s jednotkou mm/s^2 , ale také s jednotkou g nebo G, kdy se jedná o veličinu vycházející z gravitačního zrychlení $g = 9,81\text{m/s}^2$.

Poslední veličinou je výchylka vibrací (μm). Tato veličina má však velmi úzký rozsah použití. Často se používá pro monitorování technického stavu turbín, obvykle za pomoci bezdotykových sond.

Na Grafu 1 je znázorněn fázový vztah, kde je zobrazen rozdíl mezi jednotlivými veličinami. Je třeba si uvědomit, že výchylka a zrychlení jsou vzájemně v proti fázi a rychlost je vůči těmto veličinám posunuta o 90° . [5]



Graf 1 Fázové porovnání rychlosti, zrychlení a výchylky [5]

1.6.3 Snímače vibrací

Snímače vibrací se používají pro měření mechanické výchylky vibrací a její převod na elektrickou veličinu, která se dále zesiluje a zpracovává. Pro rozdílné podmínky a aplikace jsou vytvořeny různé druhy snímačů vibrací, které se mohou lišit např. rozsahem frekvence, dynamickým rozsahem, přesností, citlivostí na teplotu, cenou atd. Základní rozdělení snímačů je možno provést na dva základní druhy:

- Seismická konstrukce, které se připevňují na konstrukci stroje a jejichž výstup je mírou absolutních vibrací konstrukce.

- Snímače relativní výchylky, které měří relativní vibrační výchylku mezi rotujícími a nerotujícími částmi strojních zařízení.

Další rozdělení můžeme provést pomocí měřené veličiny – výchylka, rychlost, zrychlení.

1.6.3.1 Snímače výchylky

Rozeznáváme několik druhů snímačů pro měření výchylky, vzdálenosti nebo polohy. Nejstarším typem je pravděpodobně mechanické klouzátko, v současné době se často používá bezkontaktní snímač. Ten funguje na bázi vířivých proudů, jehož principem činnosti je využití změny Foucaultových proudů při změně odporu prostředí v důsledku změny vzdálenosti.

Z jiných druhů snímačů výchylky můžeme zmínit ještě laserové, ultrazvukové, kapacitní a indukční snímače. Snímače výchylky tvoří relativně složitý systém. V současnosti se používají zejména pro měření vibrací hřídelů, kde měří relativní vibrace hřídele vůči statorové části, obvykle ložisku.

1.6.3.2 Snímače rychlosti

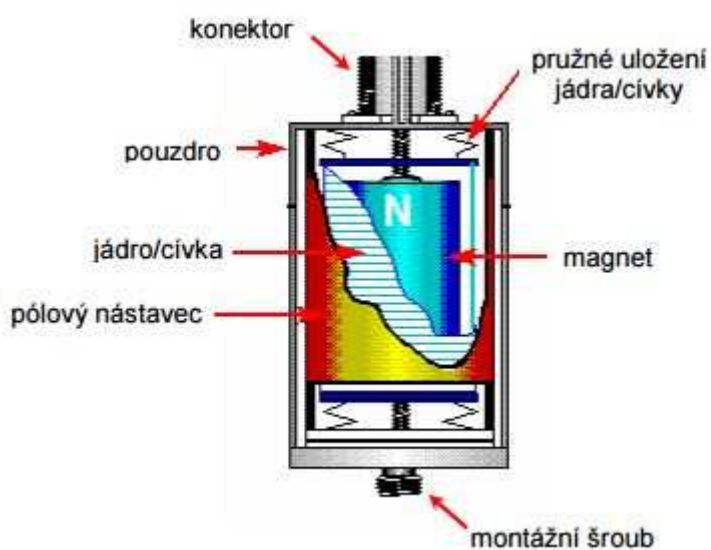
Snímače rychlosti jsou používány jako snímače vibrací u rotačních strojů už velmi dlouho a v mnohých aplikacích se používají dodnes. Pracují na principu využití elektromagnetické indukce – pohybuje-li se cívka v magnetickém poli, vytváří se na vývodech cívky napětí. Toto indukované napětí je způsobeno přenosem energie z magnetického pole do cívky a jeho velikost je přímo úměrná relativní rychlosti mezi cívkou a magnetickým polem. Snímače rychlosti jsou konstruovány tak, aby tato relativní rychlost odpovídala rychlosti vibrací měřeného stroje.

Snímače rychlosti nepotřebují ke své funkci žádné externí zařízení. Mají dvě hlavní součásti:

- Permanentní magnet – je pevně spojen s pouzdem snímače a tím, při správné montáži, i se skříní měřeného stroje.

- Cívka (duté jádro, které je ovinuté drátem) – je uložena na měkkých pružinách. Vlivem své setrvačnosti zůstává v klidu, zatímco permanentní magnet kmitá spolu s pouzdem.

Mezi výhody snímačů rychlosti patří to, že jsou poměrně levné a citlivé. Jejich nevýhoda je, že kvůli své křehké konstrukci jsou náchylné na otřesy a nejsou vhodné pro “ruční” měření. Používají se pouze trvale namontované na skříni měřeného stroje pomocí šroubu.



Obrázek 4 Snímač rychlosti [6]

1.6.3.3 Snímače zrychlení

Nejpoužívanějšími snímači vibrací jsou akcelerometry. Měřenou veličinou je zrychlení, které se dle potřeby dá početně převést na rychlost nebo výchylku vibrací.

Princip funkce akcelerometru spočívá v tom, že při deformaci destičky z piezoelektrického keramického materiálu vzniká elektrický náboj. Jeho velikost je pak přímo úměrná této deformaci. Keramická destička je umístěna mezi dvěma hmotami, z nichž jedna je setrvačná (seismická) referenční hmota a druhá je pevně spojená s pouzdem snímače, tedy i se skříní měřeného stroje (viz. Obrázek 6). Setrvačná hmota je uložena pružně – za pružinu je zde považován předpjatý šroub spolu s piezokeramickou

destičkou. Poměr tuhosti a hmotnosti této sestavy je pak vysoká, stejně jako rezonanční frekvence samotného snímače. [6]



Obrázek 5 Snímač zrychlení – tlakový typ [6]

1.6.4 Umísťování snímačů, provozní pokyny

Pro získání dat při měření vibrací je důležité nejenom použití vhodných snímačů a zařízení, ale také umístění těchto snímačů. V případě nedodržení zásad a postupů při měření vibrací, mohou být výsledkem špatná nebo podstatně zkreslená data, což může mít ve finálním výsledku katastrofální následky.

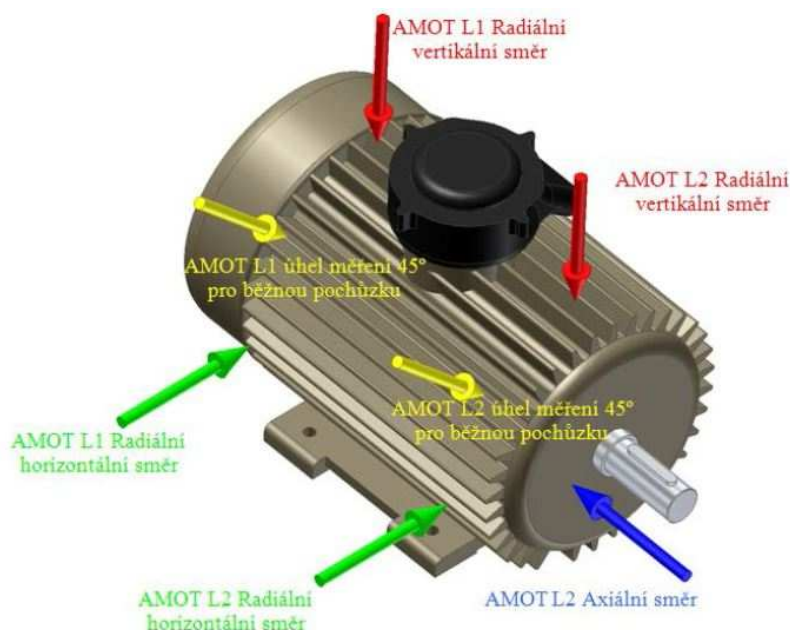
Při umísťování snímače musíme dbát na vhodnou volbu měřících míst, aby výsledky měření vyjadřovaly co nejlépe skutečnou velikost vibrací, a aby bylo možné co nejlépe stanovit technický stav měřeného zařízení. Snímače se neumísťují na znečištěné, případně lakované povrchy. Důležitá je čistota dosedací plochy snímače, zvláště u magnetického přichycení snímače často dochází ke zmagnetování volných ocelových pilin z okolí a přichycení ke snímači, respektive pod dosedací plochu snímače. Mnoho těchto nečistot dokáže značně zkreslit skutečný vibrační signál. Velice důležitá je také vzdálenost snímače od místa vzniku vibrací, protože při jeho šíření dochází se vzdáleností k jeho útlumu.

Umisťujeme a měříme v horizontálním, vertikálním a axiálním směru. Měření v horizontálním směru vykazuje většinou největší vibrace. To je způsobeno konstrukčním provedením, protože stroj bývá většinou v tomto směru poddajnější. Měření v tomto směru je proto dobrým ukazatelem nevyváženosti. V axiálním směru jsou obvykle nízké vibrace, v tomto směru se projevují vibrace, které mají souvislost s nesouosostí nebo ohnutým hřídelem.

Měření se zásadně neprovádí na přechodech, plechových krytech, atd., ale přímo na materiálu, který je v přímém kontaktu s ložiskem. Pro tyto účely je nutná znalost konstrukčního uspořádání, resp. uložení ložisek ve strojním zařízení, aby nedocházelo ke znehodnocení měření vlivem přechodů mezi jednotlivými součástmi nebo materiály. Tato znalost konstrukčního uspořádání měřeného stroje může výrazně pomoci i při následném hledání vady, popř. hledání příčiny vzniku vady.

Měření je třeba realizovat v pravidelných cyklech vždy na stejných místech, aby bylo možné měření porovnávat. Měření se provádí za chodu stroje za běžných provozních podmínek – za ustálené provozní teploty a při jmenovitém zatížení (např. zatížení, napětí, otáčkách, tlaku, atd.)

Při umisťování snímače je také nutné dbát na bezpečnost. Snímače se umisťují v dostatečné vzdálenosti od rotujících součástí na vhodných a dobře dostupných místech. Při pokládání snímače na místo měření dbáme na to, abychom snímačem zbytečně silně neklepali, aby nedošlo k jeho poškození. Na obrázku 6 je znázorněno umisťování snímačů ve třech směrech – vertikálním, horizontálním a axiálním. Žlutý směr se používá pouze pro zrychlenou pochůzku, která se používá jen pro orientační diagnostiku technického stavu měřeného zařízení. Pro dosažení lepších výsledků je třeba provádět měření v každém bodě ve všech směrech. [5]



Obrázek 6 Možnosti umístění snímačů na motoru [5]

1.6.5 Diagnostika valivých ložisek

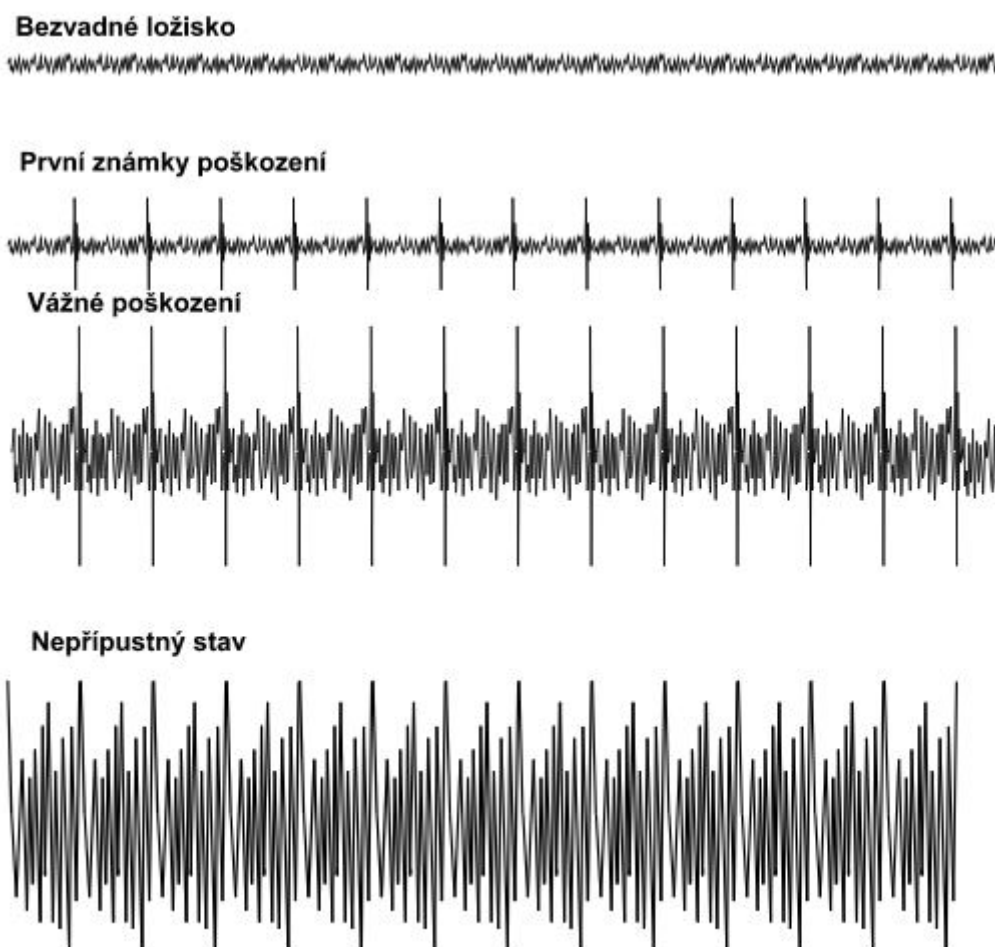
Na valivá ložiska působí během provozu mnoho faktorů, které ho mohou značně poškodit, či dokonce úplně vyřadit z provozu. Poškození ložiska může mít za následek poškození celého stroje. Abychom úspěšně předcházeli poruchám stroje, které jsou způsobeny poruchou ložiska, je nezbytné jejich včasné zjištění. Přesně k tomuto účelu slouží technická diagnostika, která využívá všech dostupných informací, aniž bychom museli rozebírat daný objekt a museli detailně prozkoumat jeho jednotlivé součástky. Zavedením technické diagnostiky tedy zvyšujeme bezpečnost a spolehlivost provozu.

Vynecháme-li metody poslechu, pohledu a dotyku, které však mohou mít v praxi také svůj význam, existuje v současné době několik metod bezdemontážní diagnostiky valivých ložisek, které jsou založeny na různých principech. Většina z těchto metod však vychází z poznatku, že při odvalování vadného ložiska dochází k nárazům a buzení kmitání.

Prací diagnostika je pak stanovení kritických míst, ve kterých je možno vhodným snímačem s elektrickým výstupem měřit změnu fyzikální veličiny, která charakterizuje poruchu, případně její vznik a vývoj. Podle měřené změny jednoho, či více fyzikálních veličin je možné určit kritérium, které charakterizuje vznik a vývoj dané poruchy až do

mezního stavu, kde hrozí havárie, a také dobu, po kterou bude možno objekt ještě používat a termín, kdy bude třeba realizovat jeho demontáž a následnou opravu.

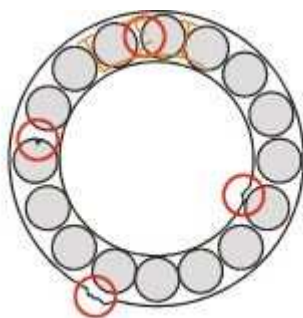
Jako příklad můžeme využít kontrolu porovnání frekvenčních spekter zaznamenaných v průběhu daného časového intervalu. Pokud dochází ke zvýšení amplitudy při špičce vlastní frekvence, může to značit poškození. Na tomto principu je založeno mnoho metod vibrodiagnostiky (viz. Obrázek 7)



Obrázek 7 Vývoj poruchy ložiska [8]

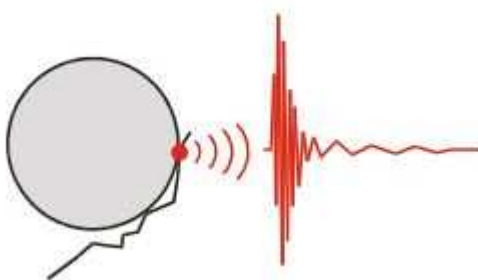
Ložiska mohou selhat z mnoha příčin. Špatné mazání – ať už příliš mnoho, nebo naopak příliš málo maziva, znečištění maziva, větší zatížení než předpokládáme – může být způsobeno jinými strojními problémy (nevývaha, nesouosost, ohnutá hřídel, atd.), špatné zacházení, špatná montáž, povrchová únava apod. Obvykle vychází počáteční únava

ložiska ze smykových napětí. Ty se objevují cyklicky, přímo pod plochou nesoucí zatížení. Po určité době způsobí tyto napětí trhliny, které se postupně rozšiřují. Přecházejí-li valivé tělesa ložiska přes tyto trhliny, kousky materiálu se odlomují. Tento jev se nazývá petting (vydrolování). Vydrolování se postupně zvětšuje a jeho následkem může být až vyřazení ložiska z provozu. Tento typ poškození však trvá poměrně dlouhou dobu a jeho šíření se dělí na čtyři etapy. [4]



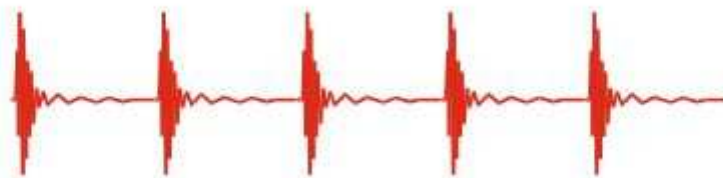
Obrázek 8 Příklad poškození ložiska – poškození kroužků ložiska [7]

Při provozním zatížení je důležité rovnoměrné odvalování valivých částí po oběhových drahách. V případě existující trhlinky je tento pohyb narušen a dochází k dynamické rázu valivého elementu (viz Obrázek 9)



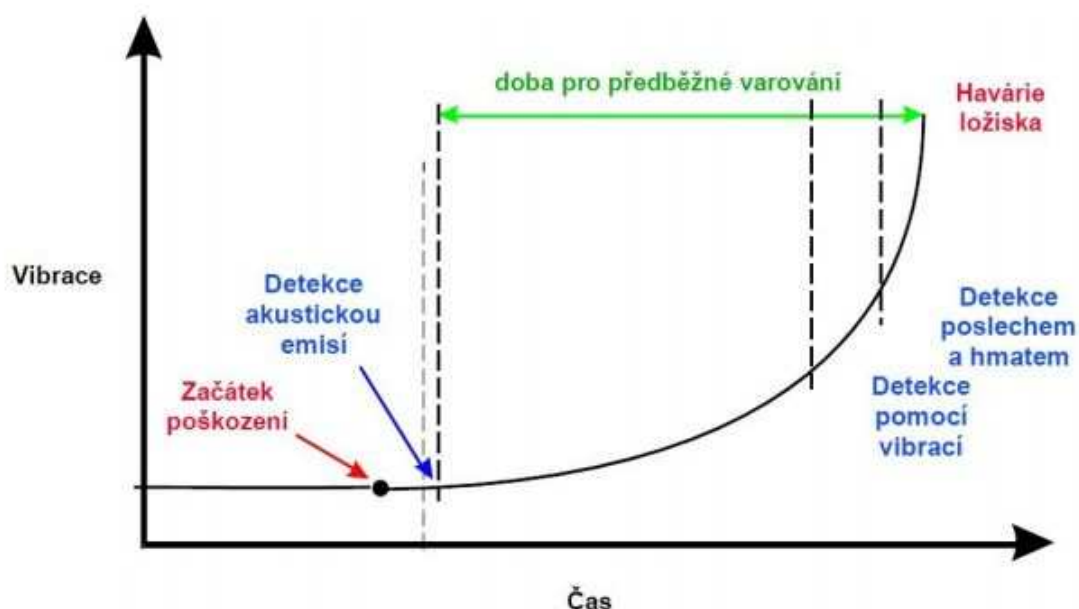
Obrázek 9 Vznik vibračního signálu [7]

Důsledkem rázu je pak impulz, který se šíří ložiskem, domkem nebo dalšími částmi stroje. Pomocí vhodného snímače vibrací jsme schopni tento ráz zachytit a vyhodnotit. Protože se přes trhlínu odvalují další a další elementy a vzniká série rázů. Celý vibrační signál je pak zobrazen na Obrázku 10.



Obrázek 10 *Vibrační signál poškozeného ložiska [7]*

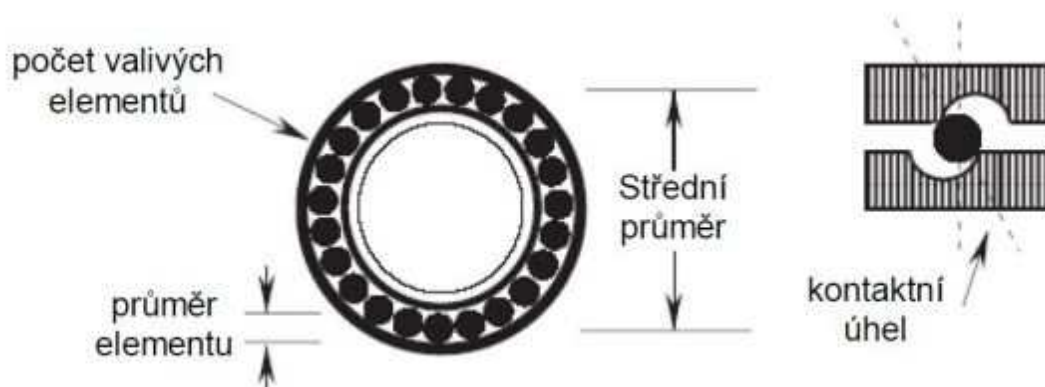
Začne-li ložisko vykazovat trend k poruše, je třeba navýšit četnost sběru dat tak, aby mohla být lépe určena bezpečnost stroje. Cílem systému údržby je pak detekovat poruchu včas, abychom získali dostatek času pro plánování nejefektivnější opravy. To se zpravidla provádí trendováním měření ložiska v závislosti na čase (viz Obrázek 11).



Obrázek 11 *Trendování měřených vibrací [4]*

Projeví-li se nadměrné přetížení povrchu prasklinou nebo vyštípnutím, jsou generovány impulsní síly pokaždé, když se valivý prvek převalí přes danou vadu v povrchu. Frekvence těchto impulsů má poměrně jednoduchý vztah vzhledem ke geometrii ložiska a k otáčkové frekvenci hřídele. Odvozené rovnice, které definují frekvence poruch jsou běžně uvedeny v literatuře. Tyto rovnice jsou však idealizovány – předpokládá se, že valivé prvky neprokluzují a jen se odvalují po povrchu ložiskových drah. Při skutečném provozu valivé elementy rotují – jejich pohyb je však kombinací

otáčení a prokluzování. Frekvence otáčení kuličky se obvykle uvádí jako odezgová frekvence poruchy na kuličce. V rovnici pro vadu na kuličce se předpokládá, že daná vada na valivém elementu se za jednu otáčku dotkne vnitřního i vnějšího kroužku. [4]



Obrázek 12 Poruchové frekvence valivého ložiska [4]

$$\text{Poškození vnějšího kroužku: } \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\phi\right) \quad (2.0)$$

$$\text{Poškození vnitřního kroužku: } \frac{n}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 + \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\phi\right) \quad (2.1)$$

$$\text{Poškození valivých prvků: } \frac{P_d}{2 \cdot B_d} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \left(\frac{B_d}{P_d}\right)^2 \cdot \cos^2\phi\right) \quad (2.2)$$

$$\text{Poškození klece: } \frac{1}{2} \cdot \frac{RPM}{60} \cdot \left(1 - \frac{B_d}{P_d} \cdot \cos\phi\right) \quad (2.3)$$

Legenda:

P_d – střední průměr ložiska

B_d – průměr valivých elementů

RPM – otáčky hřídele [1/min]

n – počet valivých elementů

ϕ - kontaktní úhel

1.6.6 Alternativní metody ke zjištění technického stavu valivých ložisek

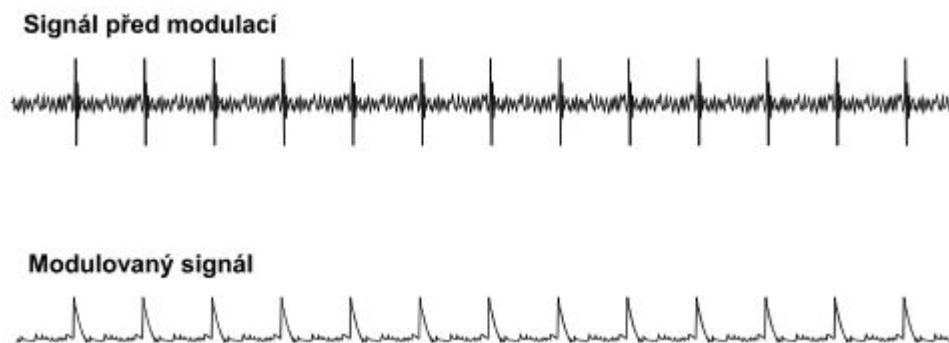
Kromě časových průběhů, frekvenčních analýz apod. jsou vibrační signály zpracovávány i jinými metodami, které umožňují lepší analýzu daného objektu, konstrukčního uzlu nebo lépe respektují provozní podmínky atd. Toto další zpracování vibračního signálu nabízí nejen další způsoby analýz, ale především má pro dané měření větší vypovídající hodnotu k určení technického stavu.

Činnost valivých ložisek, jenž má opakující se charakter vytváří vibrační signály s nižší amplitudu a vyššími frekvencemi, než je tomu tak u vibračních signálů buzených otáčkovou frekvencí. Odfiltrováním otáčkových vibračních signálů a zesílením opakujících se složek signálů od defektu valivého ložiska dosáhneme požadovaných výsledků.

1.6.6.1 Metoda obálkové analýzy

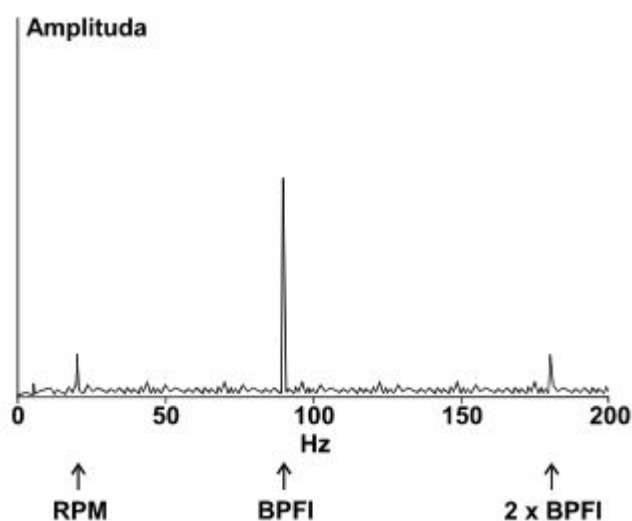
Obálková metoda představuje metodu, která detekuje porušení ložiska a ve spojení s FFT (Fast Fourier Transform) analýzou také určí, která z částí ložiska je poškozena. Rozlišují se vady na vnějším a vnitřním kroužku, valivých částí nebo kleci ložiska. Jelikož má každá z těchto částí ložiska různou relativní rychlost vzhledem k hřídeli, je možné vypočítat frekvence, na kterých se tyto vady projevují

Princip této metody spočívá v měření rázových impulzů, které vznikají odvalováním valivého elementu po porušené dráze. Poté dochází k úpravě vstupního signálu pomocí vysokofrekvenčního filtru, aby se pomocí FFT analyzátoru mohly určit poruchové frekvence. Porovnáváme-li vypočtené hodnoty s hodnotami zjištěnými díky analyzátoru, můžeme jednoznačně zjistit, která z částí ložiska je poškozena.



Obrázek 13 Příklad modulovaného signálu [8]

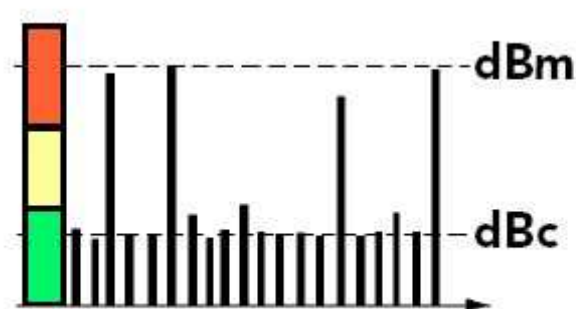
Pokud modulovaný signál zpracujeme do FFT spektra, objeví se v něm opakovací frekvence rázových impulsů. Protože však modulované rázy nemají charakter harmonického signálu, objeví se obvykle i řada harmonických složek. Také je běžné, že poruchové frekvence jsou namodulovány na nosné frekvenci – zpravidla otáčkové (viz Obrázek 14) [4]



Obrázek 14 *Příklad FFT spektra [8]*

1.6.6.2 Metoda SPM (Shock pulse meter)

Tato metoda je založena na snímání krátkodobých tlakových vln vyvolaných mechanickými rázy, které vznikají vlivem drsnosti ložiskových drah a valivých těles. Mohutnost rázových pulsů je vyjádřena na decibelové stupnici dvěma hodnotami – maximální hodnotou dBm a kobercovou hodnotou dBc. Vstupní data jsou velmi jednoduchá – otáčky a vnitřní průměr ložiska. Maximální hodnota dBm je poté vyhodnocena na stavové stupnici barvami zelená, žlutá nebo červená. Ty představují skutečný stav ložiska – dobré, upozornění a špatné. Provozní stav zahrnuje také faktory jako např.: instalace, zatížení, kvalita mazání a mechanický stav povrchu ložiska – drah a valivých elementů. [15]



Obrázek 15 Příklad metody SPM s vyjádřením hodnot dBm a dBc [9]

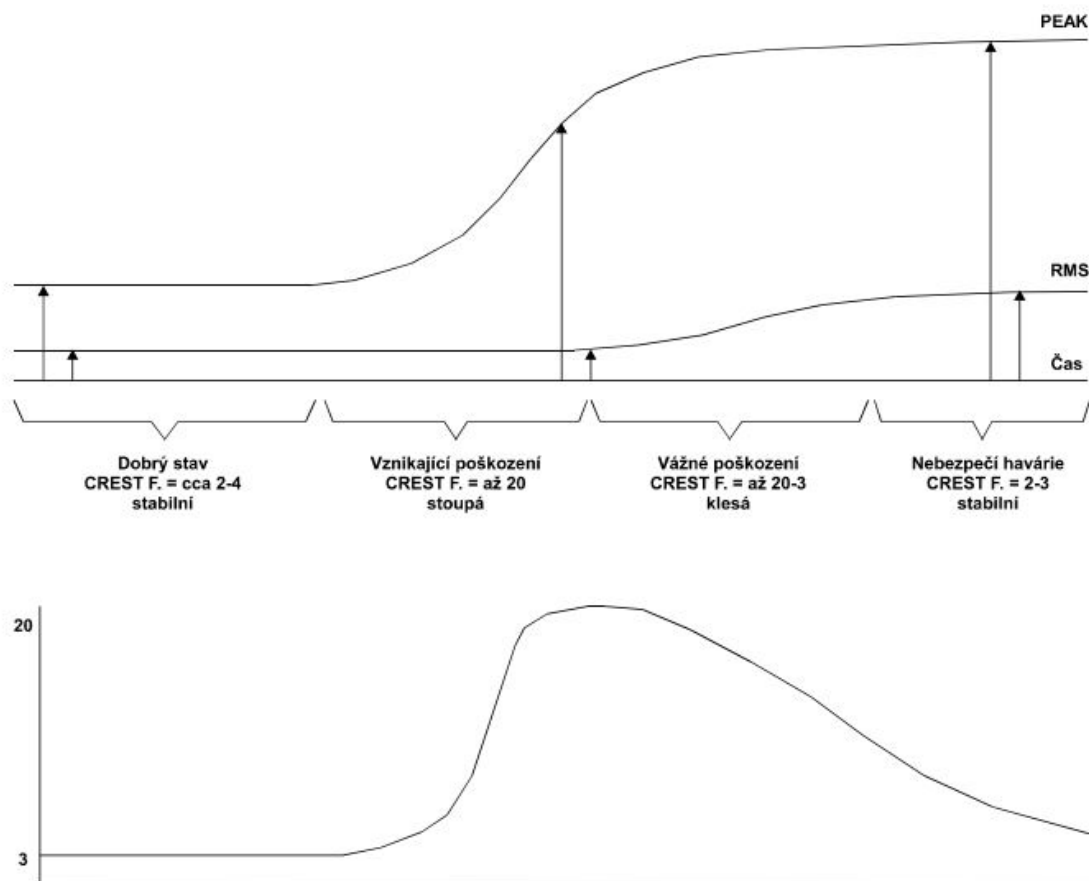
1.6.6.3 Metoda BCU

Princip této metody je založen na snímání rázových impulzů poškozeného ložiska pomocí snímačů přiložených na ložisko. Vzniklé kmitání má energii, které je určena a vyhodnocena spolu s četností výskytu na základě délky odeznívání kmitů. Poté je vytvořena tzv. charakteristická veličina stavu ložisek – BCU (BearingCondition Unit).

Měření je ovlivněno několika parametry – např. otáčkami motoru, rozměry ložiska, geometrickým tvarem valivých částí, což neumožňuje posouzení stavu ložiska z naměřených hodnot pomocí obecně platných norem. Místo toho se používá srovnání s absolutně stejným ložiskem, které bylo proměřeno na stejném místě monitorovaného stroje od montáže po vyřazení z funkce. Trendová křivka získaná tímto způsobem pak slouží jako referenční. Musí však být sestavena pro každé ložisko zvlášť. Není-li referenční křivka k dispozici, může se poškození posoudit na základě změny charakteristické veličiny vzhledem k hodnotě pro nově namontované ložisko. Pokud hodnota BCU poškozeného ložiska překročí hodnotu nového ložiska o činitel 3-4, je velice pravděpodobné brzké poškození ložiska. [4]

1.6.6.4 Crest faktor

Principem této metody je měření efektivní a špičkové hodnoty vibrací a ve výpočtu jejich poměru. Protože se vyhodnocuje poměr dvou hodnot, je tato metoda naprosto nezávislá na typu ložiska a otáčkách hřídele. Crest faktor je velice citlivým parametrem při vzniku mechanického poškození ložiska, které tato metoda rozpozná již v ranném stádiu. Crest faktor je také velmi vhodným indikátorem poruch mazání. [4]



Obrázek 16 Časový průběh Crest Faktoru [8]

1.6.6.5 Metoda SEE

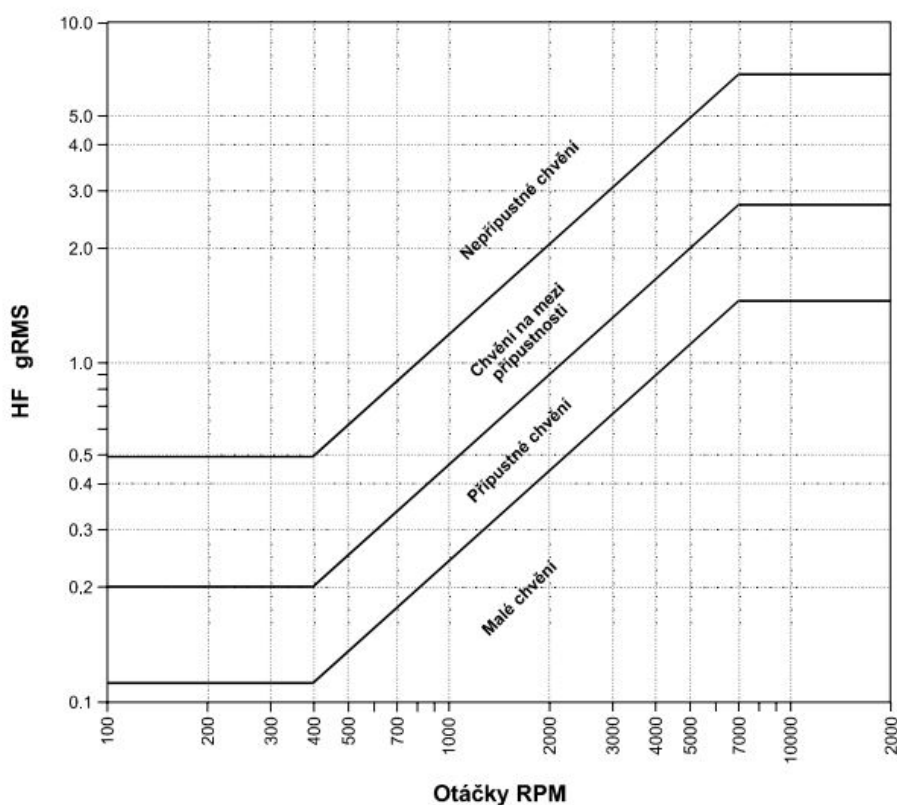
Tato metoda umožňuje včasnou detekci poruch ložisek měřením akustické emise generované kovem. Aktivní okolnosti vedoucí ke vzniku akustické emise jsou např. defekty ložisek, nevhodné mazání, třískové obrábění kovů, tření ložiska, atd.

Metoda SEE (Spectral Emitted Energy) využívá speciální snímače akustické energie, které umožňují detekovat ultrazvukovou akustickou emisi, která vzniká následkem poškození elementů ložisek. Takový vibrační signál není ani tak vibračním signálem, ale spíše jde o zvuk vysoké frekvence. [4]

1.6.6.6 HF (HighFrequencyemision)

Měření parametru HF vychází z poznatku, že při začínajícím poškození narůstá energie vibrací ve vyšších frekvencích. Tato metoda je velmi citlivá na poruchy mazání. Velmi včasně indikuje nedostatečné mazání i přítomnost mechanického znečištění v mazivu. Je výsledkem výzkumu poruch ložisek ve firmě Adash.

Emitovaná vysokofrekvenční energie bývá vyhodnocována do efektivní hodnoty a vyjádřena v jednotce g ($9,81\text{m/s}^2$). Hodnoty g_{RMS} jsou závislé na otáčkách hřídele a pro vyhodnocování závažnosti poruchy se používá následující graf. [8]



Obrázek 17 Graf závažnosti poruch pomocí metody HF [8]

1.6.6.7 Kurtosis faktor

Parametr kurtosis reprezentuje oproti ostatním metodám analýzu stavu ložisek statistický přístup. Základem úvahy je fakt, že náhodný vibrační signál má Gausovo normální rozdělení, tzn., že se v něm nevyskytují harmonické ani vysokofrekvenční pravidelné složky. Jestliže potřebujeme určit, zda vibrační signál tuto podmínku opravdu splňuje, musí se stanovit dva parametry. Jde o šikmost a špičatost. Pro účely vibrační diagnostiky se využívá především špičatost. Šikmost je ovlivněna symetrií rozdělení signálu a tato vlastnost není pro vyhodnocení technického stavu ložisek tak důležitá. [4]

Velikost K-faktoru se stanoví z následujícího vztahu:

$$K_a = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - \bar{x})^4 \cdot p(x) dx}{\sigma^4} \quad (2.4)$$

Legenda:

x - amplituda signálu

\bar{x} - střední hodnota signálu x

$p(x)$ – pravděpodobnost (x)

σ - směrodatná nebo efektivní odchylka vůči nulovému signálu

2 Charakteristika společnosti Siemens s.r.o

Skupina Siemens Česká republika je součástí globálního elektronického koncernu Siemens AG, který je více než 165 let synonymem pro špičkové technologie, inovace, kvalitu a spolehlivost. Společnost již působí ve více než 200 zemích světa a své aktivity rozvíjí zejména v oblastech elektrifikace, automatizace a digitalizace. Siemens AG patří k největším poskytovatelům technologií šetrných k životnímu prostředí. Je jedničkou na trhu v instalaci offshore větrných elektráren, jedním z hlavních dodavatelů pro paroplynové zdroje a technologií pro přenos energie. Siemens také patří mezi průkopníky řešení v oblasti veřejné infrastruktury, průmyslové automatizace a softwarových řešení pro průmysl. Společnost patří také mezi hlavní dodavatele zdravotnických zobrazovacích zařízení a technologií pro laboratorní diagnostiku. V roce 2015 dosáhla společnost Siemens obrátu 75,6 miliard EUR s čistým ziskem 7,4 miliard EUR a zaměstnává 348 tisíc zaměstnanců po celém světě.



Obrázek 18 Logo společnosti Siemens s.r.o [11]

Mezi referenční zakázky v České republice patří např. výroba plzeňského piva, největší dalekohled v Ondřejovské hvězdárně, lakování škodovek z Kvasin, systém, který řídí dopravu na pražském silničním okruhu – tyto všechny projekty jsou řízeny technologií Siemens. Dále pak tato společnost dodala historicky první magnetickou rezonanci pro pražský IKEM, 265 vozů pro pražské metro, první počítačový tomograf do fakultní nemocnice Hradec Králové nebo třeba vybavení laboratorního pracoviště VŠB Ostrava pro katedru měřicí a řídicí techniky.



Obrázek 19 Řízení výroby sladu v Plzeňském Prazdroji [11]

Společnost Siemens má na území České republiky následující výrobní závody:

- Mohelnice – elektromotory a přípojnicové systémy
- Frenštát pod Radhoštěm – elektromotory
- Letohrad – jištění elektrických obvodů
- Trutnov – nízkonapěťová spínací technika
- Drásov – elektromotory a generátory
- Brno – průmyslové parní turbíny

Tato Diplomová práce byla provedena v Siemens, s.r.o., odštěpný závod Elektromotory Frenštát. Tento závod je jedním z předních světových výrobců nízkonapěťových asynchronních elektromotorů. V současné době je největším závodem v Evropě na výrobu standardních elektromotorů osových výšek 225 – 315mm. Elektromotory mají výkon v rozsahu 18,5 – 315kW a váhu v rozsahu 300 – 1500kg. Za rok frenštátský závod vyrobí až 2500 nových variant motorů dle specifických přání zákazníka.

Siemens, s.r.o., odštěpný závod Elektromotory Frenštát zaměstnává více než 1000 lidí a to z něj dělá druhého největšího zaměstnavatele ve Frenštátě pod Radhoštěm. Elektromotory jsou rozesílány do celého světa. Závod například dodal sto speciálních motorů pro pohon přístavních jeřábů v Indonésii. Hlavními zákazníky jsou výrobci čerpadel, kompresorů a klimatizačních zařízení. Motory ve Frenštátě se vyrábějí od roku 1947. Společnost Siemens závod koupila v roce 1994. [11]

Společnost Siemens je aktivní v následujících odvětvích:

- Energetika – Technologie pro výrobu energie z fosilních a obnovitelných zdrojů (např. vodní, větrná a geotermální energie, biomasa), přenos a distribuce energie.
- Infrastruktura – Technologie budov, železniční doprava a řešení silniční dopravy, veřejné osvětlení
- Průmysl – Systémy průmyslové automatizace, pohony, projekty a řešení pro průmysl.
- Zdravotnictví – Počítačové tomografie, magnetická rezonance, laboratorní diagnostika.

Strategie a hodnoty společnosti Siemens:

- Digitalizace – Spojovat technologické know-how s obrovským množstvím získaných dat. Díky tomu tak zákazníkům přinášet přidanou hodnotu.
- Udržitelná energie – Pomáhat elektrifikovat celý svět, přinášet řešení pro udržitelnou výrobu, spolehlivou a efektivní distribuci a samozřejmě také odpovídající spotřebu elektrické energie.
- Budoucnost výroby – Efektivně spojovat virtuální a reálné světy, od vývoje až po výrobu. Přinášet zákazníkům technologie v oblasti automatizace pohonů, které jim pomohou dosáhnout vyšší produktivity, flexibilitu, lepšího využití zdrojů a kratších výrobních časů.
- Inteligentní infrastruktura – Díky řešením pro automatizaci a digitalizaci pomáhat zákazníkům využít plného potenciálu městské infrastruktury pro vyšší efektivitu, snížení operativních nákladů, zvýšení bezpečnosti a snížení environmentálního zatížení.
- Špičkový výkon – Snažit se co nejvíce porozumět potřebám zákazníka, dávat si vysoké cíle a hledat vždy co nejefektivnější cestu, jak jich dosáhnout. Špičková kvalita je výsledkem týmové práce.
- Inovativnost – Hledat technologie, které udávají trend, otevírají nové horizonty a jsou skutečným přínosem pro zákazníka.

- Odpovědnost podnikání – Chovat se odpovědně vůči svému okolí. Dodržovat zákony a ctít nejvyšší etické standardy. Využívat technologie, které pomáhají chránit životní prostředí. Podporovat charitu a vzdělání.

2.1 Použité měřicí přístroje



Obrázek 20 Použité měřicí přístroje

Pro potřeby této diplomové práce byly použity dva měřicí přístroje:

- **Analyzátor SKF Microlog AX** (na Obrázku 21 vlevo)

Analyzátory SKF Microlog napomáhají plnit úkoly požadované k provádění předpovědění údržby na otáčivých strojích v řadě průmyslových oborů. Tento analyzátor usnadňuje shromažďování, analyzování a sdílení dat o technickém stavu měřeného stroje. Analyzátory SKF Microlog automaticky shromažďují data dynamických i statických měření z prakticky jakéhokoliv zdroje. Může také shromažďovat měření teploty pomocí bezkontaktního infračerveného čidla nebo kontaktní sondy. Analyzátor SKF Microlog AX byl pro potřeby této práce využit pro měření FFT spektra zrychlení a obálky zrychlení. [10]

- **Data logger Leonova SPM** (na Obrázku 21 vpravo)

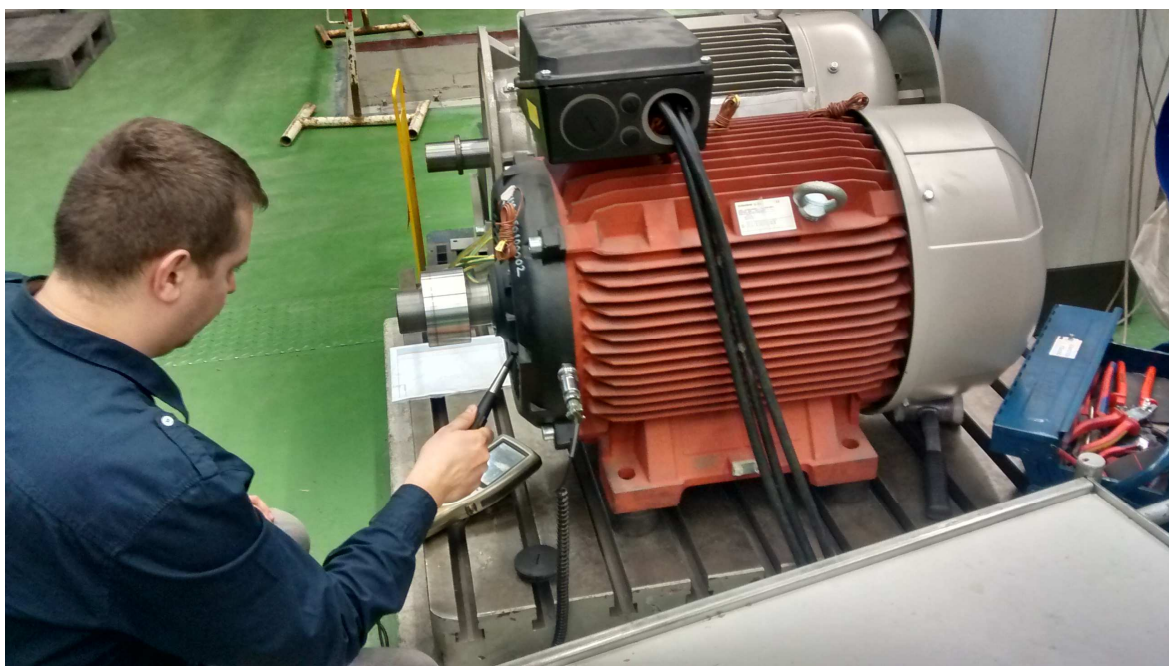
Leonova je ruční analyzátor stavu strojů s dotykovou obrazovkou, pracující v prostředí Windows CE. Leonova může měřit rázové pulsy, vibrace, rychlost, teplotu a analogové signály (napěťové a proudové). Přístroj lze rovněž použít pro vyvažování rotorů a ustavování souososti hřídele. Tento analyzátor byl využit pro měření rázových pulsů SPM (Shock Pulse Method) ve dvou příbuzných, vzájemně se doplňujících měřících technikách:

- SPM dBm/dBc
- SPM Spektrum

2.2 Postup měření

Měření vibrací bylo provedeno na kuličkovém ložisku ORS 6215. Pro potřeby této práce byla společností Siemens dodána 4 ložiska, která byla uměle poškozena.

Ložiska byla následně osazena na motor (parametry elektromotoru – viz. Tabulka 1) a poté změřena pomocí vhodných diagnostických metod. Ložisko na straně NDE (strana ventilátoru) je uložené pevně, na straně DE (strana pohonu) je axiálně volné. Všechna ložiska byla měřena bez zátěže. Poté bylo provedeno vyhodnocení měření a porovnání použitých diagnostických metod.



Obrázek 21 Záznam z měření

Tabulka 1 Parametry Elektromotoru

Jmenovité napětí	380V
Jmenovitý proud	103A
Jmenovitý výkon	55kW
Účíník	cos 0,88
Otáčky	2970/min
Výška osy motoru	250mm

Tabulka 2 Chybové frekvence měřeného ložiska, BPO – chybová frekvence při závadě na vnějším kroužku, BPI – chybová frekvence na vnitřním kroužku, BS – chybová frekvence na kuličce nebo válečku, FT – chybová frekvence klece

Číslo ložiska	<input type="text" value="6215"/>	
Výrobce	<input type="text" value="KOY"/>	
TYP č.	<input type="text" value="1"/>	
Vnitřní průměr	<input type="text" value="75"/>	mm
Vnější průměr	<input type="text" value="130"/>	mm
Hlavní průměr	<input type="text" value="102,5"/>	mm
Šířka	<input type="text" value="25"/>	mm
Dynamické C	<input type="text"/>	Newton (N)
Statické C0	<input type="text"/>	Newton (N)
BPO	<input type="text" value="4,109"/>	
BPI	<input type="text" value="5,891"/>	
BS	<input type="text" value="2,718"/>	
FT	<input type="text" value="0,411"/>	

Nasimulována byla následující poškození:

- Poškození vnitřního kroužku
- Poškození vnějšího kroužku
- Poškození vlivem nečistot v mazivu
- Poškození kuličky ložiska

Součástí bylo také měření ložiska nového za účelem porovnání naměřených hodnot nového ložiska s ložiskem poškozeným. Změřeno bylo také jedno ložisko, které bylo poškozeno “přirozenou“ cestou ve skutečných provozních podmínkách.

Všechna tato ložiska byla změřena pomocí následujících diagnostických metod:

- **Metoda rázových pulzů SPM – dBm/dBc** – Mohutnost rázových pulzů je vyjádřena na decibelové stupnici (osa Y) pomocí dvou hodnot – maximální hodnota dBm a kobercová hodnota dBc. Vyhodnocení se provádí pomocí maximální hodnoty dBm. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 4 a vyhodnoceny v grafu 2.
- **Metoda rázových pulzů SPM – SPM Spektrum** – Nadstavba pro metodu dBm/dBc. Používá se pro potvrzení, zda rázové pulsy pocházejí opravdu z ložiska, případně pro lokalizaci poruchy na ložisku. Osa X v SPM grafech spektra představuje kmitočet v Hz. Osa Y je uváděna v jednotkách SE (SPM Envelope Unit). Z důvodu rozsáhlé velikosti naměřených spekter jsou tato spektra uvedeny na konci této práce v příloze.
- **Vyhodnocení efektivní hodnoty podle normy ČSN EN 60034-14 – točivé elektrické stroje** - Měřenou a vyhodnocovanou veličinou je efektivní hodnota rychlosti vibrací – a_{RMS} [$m.s^2$], která je následně porovnána s doporučenými hodnotami. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 2, doporučené mezní hodnoty v Tabulce 3.
- **FFT spektrum zrychlení** - Osa X v grafech spektra zrychlení představuje kmitočet v Hz. Osa Y je uvedena v jednotce mm/s^2 . Z důvodu rozsáhlé velikosti jsou spektra uvedeny na konci této práce v příloze.
- **Obálka zrychlení** - Osa X v grafech obálky zrychlení představuje kmitočet v Hz. Osa Y je uvedena v jednotce gE. Z důvodu rozsáhlé velikosti jsou grafy uvedeny na konci této práce v příloze.

Všechna spektra byla měřena v oblasti 0 – 2000Hz.

2.3 Hodnocení zrychlení vibrací podle normy

Vibrace pro dané zařízení jsou hodnoceny dle normy ČSN EN 60034-14 – točivé elektrické stroje – mechanické vibrace určitých strojů s výškou osy od 56mm. Měřenou a vyhodnocovanou veličinou je efektivní hodnota rychlosti vibrací – a_{RMS} [m.s²]. Uložení elektromotoru je pružné, výška osy H=250mm.

Tabulka 3 Naměřené efektivní hodnoty

Typ poškození	Naměřené efektivní hodnoty [m.s ²]
Poškození vnitřního kroužku	0,84
Poškození vnějšího kroužku	1,11
Poškození vlivem nečistot v mazivu	3,87
Nové ložisko	0,74
Poškození kuličky ložiska	1,33

Tabulka 4 Mezní hodnoty maximální velikosti vibrací v efektivních hodnotách výchylky, rychlosti, a zrychlení pro výšku osy H

	Výška osy mm	56 ≤ H ≤ 132			132 < H ≤ 280			H > 280		
Stupeň vibrací	Uložení	Výchylka μm	Rychlost mm/s	Zrychlení m/s ²	Výchylka μm	Rychlost mm/s	Zrychlení m/s ²	Výchylka μm	Rychlost mm/s	Zrychlení m/s ²
A	Pružné uložení	25	1,6	2,5	35	2,2	3,5	45	2,8,	4,4
	Pevné uložení	21	1,3	2,0	29	1,8	2,8	37	2,3	3,6
B	Pružné uložení	11	0,7	1,1	18	1,1	1,7	29	1,8	2,8
	Pevné uložení	-	-	-	14	0,9	1,4	24	1,5	2,4

Stupeň A platí pro stroje bez zvláštních požadavků na vibrace.

Stupeň B platí pro stroje se zvláštními požadavky na vibrace.

2.4 Hodnocení vibrací podle metody SPM dBm/dBc

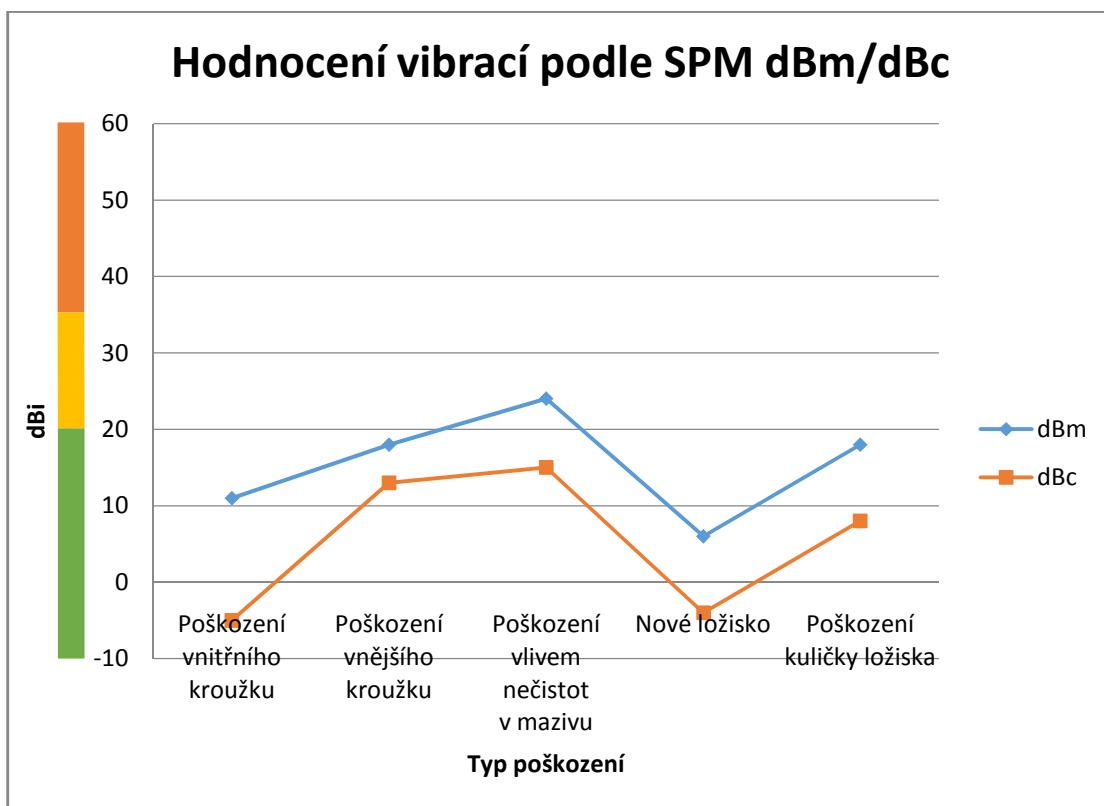
Teorie k této metodě byla rozebrána v kapitole 1.6.6.2.

Pomocí přístroje Leonova byly zjištěny následující hodnoty:

- Maximální hodnoty dBm pro malý počet silných rázových pulsů.
- Kobercové hodnoty dBc pro velký počet slabších rázových pulsů.

Tabulka 5 Naměřené hodnoty dBm/dBc

Typ poškození	dBm	dBc
Poškození vnitřního kroužku	11	-5
Poškození vnějšího kroužku	18	13
Poškození vlivem nečistot v mazivu	24	15
Nové ložisko	6	-4
Poškození kuličky ložiska	18	8



Graf 2 Hodnocení vibrací podle SPM dBm/dBc

Stavový indikátor, který je zelený pro dBm menší než 20 = dobrý stav ložiska, žlutý pro 21 – 34 = varování a červený pro 34 a větší = špatný stav ložiska. Podle této metody jsou tedy všechna ložiska kromě ložiska poškozeného vlivem nečistot v mazivu vyhodnocena jako dobrá.

Stav ložiska lze vyhodnotit pomocí velikosti naměřených hodnot dBm a dBc a pomocí jejich rozdílu. Pokud naměříme zvýšené hodnoty dBm, používá se jako nadstavba také metoda SPM spektrum. Informace ze spektra nám řekne, zda analyzovaný signál pochází z ložiska, případně můžeme určit, která část ložiska je poškozena. Spektrum má však při hodnocení stavu ložiska pouze sekundární roli.

2.5 Vyhodnocení ložiska s poškozením vnitřního kroužku

Simulace poškození ložiska ORS 6215 byla provedena umělým zásahem do vnitřního kroužku ložiska pomocí vrypů (viz. Obrázek 22). Cílem zásahu bylo způsobit poškození ložiska podobný běžnému defektu ložiska. Toto poškozené ložisko bylo následně osazeno na motor a změřeno pomocí výše uvedených diagnostických metod.



Obrázek 22 *Poškození vnitřního kroužku*

Pomocí metody SPM dBm/dBc byla naměřena hodnota 11dB, přičemž výstraha podle doporučených hodnot začíná na hodnotě 20dB. Podle této metody je tedy ložisko

vyhodnoceno jako dobré. Při použití doplňkové metody SPM Spektrum (viz Příloha A) vyčnívají pouze 3 špičky. Ty odpovídají chybovým frekvencím poškození na vnitřním kroužku (poruchové frekvence jsou v grafech vždy zvýrazněny červenou svislou přerušovanou čarou). Pomocí této metody tak můžeme poměrně jednoduše identifikovat, na které části ložiska se defekt nachází.

Dále byla naměřena efektivní hodnota $a_{\text{RMS}}=0,84\text{m/s}^2$. Mezní hodnota maximální velikosti zrychlení v efektivní hodnotě podle normy ČSN EN 60034-14 – točivé elektrické stroje uložené pružně a výšku osy $H=250\text{mm}$ činí $3,5\text{m/s}^2$ pro stroje bez zvláštních požadavků na vibrace a $1,7\text{m/s}^2$ pro stroje se zvláštními požadavky na stroje. Ložisko je tedy podle této normy vyhodnoceno také jako dobré.

Na frekvenčním spektru zrychlení (viz. Příloha B) jsou dominantní špičky 50, 100, 1399 a 1499Hz. Žádná z těchto frekvencí však neodpovídá chybové frekvenci poškození na vnitřním kroužku. Naopak pomocí obálkové metody (Příloha C) můžeme pomocí červeně znázorněných chybových frekvencí vnitřního kroužku identifikovat defekt na této části ložiska. Tyto chybové frekvence přesně kopírují naměřené špičky.

2.6 Vyhodnocení ložiska s poškozením vnějšího kroužku

Vnější kroužek měřeného ložiska byl poškozen stejně jako kroužek vnitřní – pomocí vrypů (viz obrázek 24). Postup měření je stejný jako u ložiska s poškozením vnitřního kroužku.



Obrázek 23 Poškození vnějšího kroužku

Při využití metody SPM dBm/dBc byla naměřena hodnota 18dB. Podle doporučených hodnot je tak ložisko vyhodnoceno také jako dobré, avšak lze předpokládat, že by se tato porucha začala velmi rychle rozvíjet, tudíž by tento stav neměl vydržet dlouho. Při pohledu na Spektrum pomocí metody SPM (Příloha D) lze opět velice jednoduše odhalit poškození na vnějším kroužku. Vystupují pouze 3 špičky – 205,625; 411,875 a 617,5 Hz. Tato frekvence odpovídá chybové frekvenci poškození vnějšího kroužku a jejím násobkům.

Efektivní hodnota tohoto ložiska činí $1,11\text{m/s}^2$, což norma ČSN EN 60034-14 vyhodnocuje jako dobré. Mezní hodnoty jsou stejné jako u předchozího měření, tzn. $3,5\text{m/s}^2$ pro stroje bez zvláštních požadavků na vibrace a $1,7\text{m/s}^2$ pro stroje se zvláštními požadavky na stroje.

Při pohledu na frekvenční spektrum (Příloha E) vyčnívá opět pouze otáčková frekvence – 50Hz. Podle tohoto spektra nejsme schopni určit, na jaké části ložiska se porucha nachází. To se opět nedá říct o obálkové metodě (Příloha F), jejichž naměřené špičky spolehlivě kopírují chybové frekvence poruchy na vnějším kroužku.

2.7 Vyhodnocení ložiska s poškozením vlivem nečistot v mazivu

Mezi mazivo tohoto ložiska bylo záměrně přidáno značné množství ocelových pilin. Cílem tohoto měření bylo nasimulovat poškození vlivem špatného mazání.



Obrázek 24 Poškození ložiska vlivem nečistot v mazivu

Toto ložisko nebylo jako jediné vyhodnoceno jako dobré jak podle metody SPM, tak podle normy ČSN EN 60034-14. Metodou SPM byla naměřena hodnota 24dB (výstraha začíná na hodnotě 20dB). Podle teorie této metody značí vysoké hodnoty $\text{dBm} > 20$ s malým rozdílem ($\Delta \text{dBm} - \text{dBc} < 10$) znamenají omezené mazání nebo suchý chod. Rozdíl dBm a dBc u ložiska poškozeného vlivem nečistot v mazivu je 9. Lze tedy říct, že tato metoda si s daným poškozením poradila velice dobře. Spektrum pomocí metody SPM vykazuje špičky, které se rovnají chybové frekvenci poškození vnějšího kroužku, avšak hodnoty těchto špiček nejsou tak velké v porovnání s předchozím měřením. Efektivní hodnota zrychlení tohoto ložiska činí $3,87 \text{ m/s}^2$, což norma vyhodnocuje jako ložisko špatné jak pro stroje bez zvláštních požadavků na vibrace, tak pro stroje se zvláštními požadavky na vibrace.

Pomocí frekvenčního spektra zrychlení ložiska s nečistotami v mazivu (Příloha H) můžeme v porovnání s frekvenčním spektrem nového ložiska (Příloha K) vidět zvýšené hodnoty, prakticky v celé oblasti měřeného spektra.

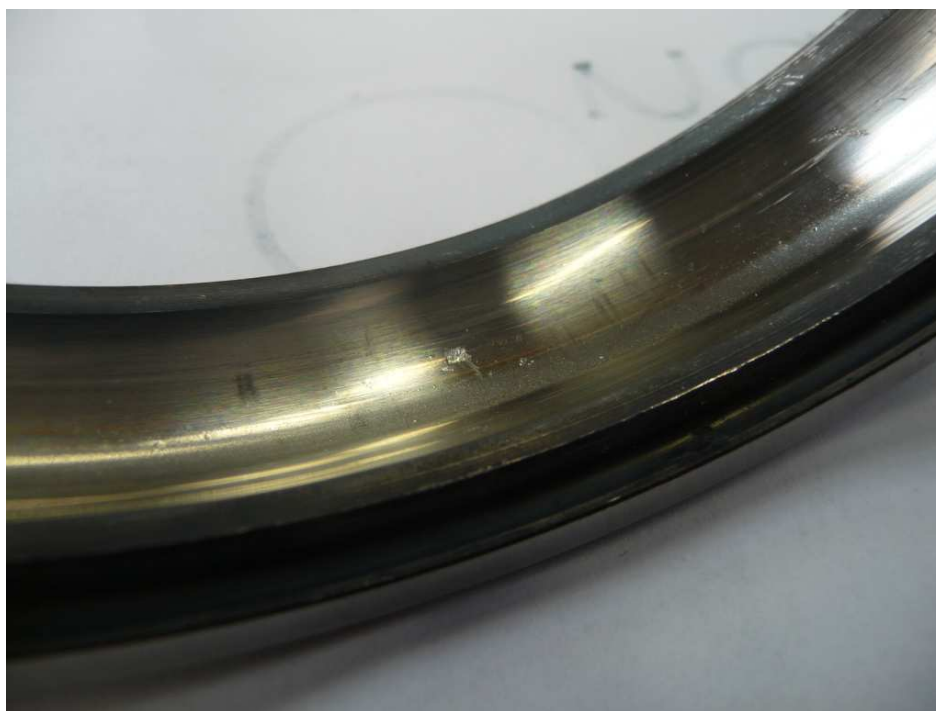
V porovnání obálky zrychlení ložiska s nečistoty v mazivu (Příloha I) a obálky zrychlení nového ložiska (Příloha L) nalezneme prakticky totožné hodnoty. Na grafu s naměřenými hodnotami pomocí obálky zrychlení s ložiskem s nečistoty v mazivu vyčnívají špičky, které odpovídají chybovým frekvencím poškození vnějšího kroužku. Obálková metoda si tedy jako jediná s tímto druhem poškození neporadila dobře.

2.8 Vyhodnocení ložiska s poškozenou kuličkou

Poškodit kuličku ložiska bylo poměrně komplikované – dostat se přes klec ložiska ke kuličce bylo náročné. Kuličku se nakonec poškodit podařilo, ale při snaze poškodit kuličku došlo také k poškození vnějšího kroužku (viz. Obrázek 26). Poškození kuličky na Obrázku 25 je po měření ložiska “zaleštěné“, takže nejde moc dobře vidět. Pomocí žádné z použitých metod nebylo poškození kuličky identifikovatelné. Kuličky se nepodařilo dostatečně poškodit - hodnoty měření pomocí všech metod odpovídají poškození vnějšího kroužku (viz. Příloha M, N, O). Jelikož se toto měření uskutečnilo později než měření předchozí, je měření provedeno na jiném elektromotoru. Jediný rozdíl je v otáčkách – nyní 1500/min místo původních 3000/min.



Obrázek 25 *Poškození kuličky ložiska*



Obrázek 26 *Neúmyslné poškození vnějšího kroužku ložiska*

2.9 Vyhodnocení ložiska s poškozením z provozu

Spojili jsme se s reklamačním centrem Siemens, s.r.o., odštěpný závod Elektromotory Frenštát, abychom mohli změřit také ložisko, které bylo poškozeno v reálném provozu a ne poškozeno uměle, jako ložiska měřené do teď. Jedno takové ložisko se nám podařilo získat. Jedná se o ložisko DE-6213-Z. Toto ložisko je těžce poškozeno vlivem přílišného axiálního pnutí. Na Obrázku 27 můžeme vidět kráterky prakticky po celém obvodu vnitřního kroužku. Tyto kráterky jsou však axiálně vychýleny vlivem velké zátěže v axiálním směru.

Ložisko jsme pro změřili stejně jako ostatní, uměle poškozená ložiska – bez zátěže. Výsledky měření pomocí metody SPM spektrum (Příloha P) jsou prakticky srovnatelné s měřeními nového ložiska. Kuličky byly odvalovány mimo poškozenou část vnitřního kroužku. Pomocí obálkové metody zrychlení (Příloha R) byla naměřena nejvyšší hodnota vibrací 0,1095 gE, což je přibližně stejná hodnota jako při poškození kuličky.

Nejvyšší naměřené hodnoty byly pomocí frekvenčního spektra zrychlení (Příloha Q) – nejvyšší špička $4,75\text{m/s}^2$. Pro porovnání – nejvyšší hodnota ložiska s poškozením vlivem nečistot v mazivu dosáhla hodnoty $1,728\text{m/s}^2$. Kdybychom měřili ložisko pouze pomocí metody SPM a obálkové metody, nebyli bychom schopni identifikovat tak zásadní poruchu. Ložisko je tedy nutné vždy měřit s původním zatížením, nejlépe na stroji, na kterém konalo svou činnost.



Obrázek 27 Poškození ložiska z provozu

ZÁVĚR

V této diplomové práci jsem se zabýval vibrodiagnostikou valivých ložisek. V teoretické části byly vysvětleny základní pojmy týkající se dané problematiky. Dále zde byly uvedeny dostupné metody, které se používají pro diagnostiku technického stavu valivých ložisek.

V praktické části jsem využil poznatky získané v předchozí části této práce na základě zadání ze společnosti Siemens, s.r.o., odštěpný závod Elektromotory Frenštát. Pro potřeby této práce byly provedeny simulace poškození ložiska ORS 6215 umělým zásahem. Cílem zásahu bylo způsobit poškození ložiska podobný běžnému defektu ložiska. Umělé poškození bylo provedeno vrypem na vnitřním, vnějším kroužku a valivém tělesu ložiska. Další ložisko bylo poškozené vlivem nečistot v mazivu. K dispozici jsme měli také jedno reklamované ložisko, které bylo poškozeno ve skutečných provozních podmínkách. Změřeno bylo také ložisko nové, z důvodu porovnání výsledků měření. Tato ložiska byla změřena a vyhodnocena pomocí metody rázových pulzů SPM, frekvenčního spektra zrychlení, obálky zrychlení a hodnocení vibrací podle ČSN EN 60034-14.

Pro diagnostiku poruch byly použity chybové frekvence měřeného ložiska ve spektru vibrací. Poruchy v raném stádiu byly zřetelně identifikovány zejména pomocí obálkové metody. Bylo ověřeno, že obálková metoda umožňuje dřívejší detekci poruch než frekvenční spektrum zrychlení vibrací. Poruchy byly také velice spolehlivě detekovány pomocí metody rázových pulzů SPM. Rozdíl mezi metodou SPM a ostatními použitými metodami spočívá v jednoduchosti a spolehlivosti vyhodnocení. Tato metoda dokáže dát přímou odpověď v termínu dobrý stav ložiska, výstraha nebo špatný stav. Odpadá tak nutnost vyhodnocovat spektrum. To se děje pouze za předpokladu, chceme-li identifikovat, na které z části ložiska se defekt nachází.

Cílem této práce bylo provést potřebná měření a vyhodnotit konkrétní provozní vyhodnocení. Z výše uvedeného plyne, že tento cíl byl splněn a diplomová práce přinesla přínosné poznatky v oblasti vibrací diagnostiky valivých ložisek.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] *ZKL GROUP - Zásady pro volbu a použití ložisek* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/3-zasady-pro-volbu-pouziti-lozisek>
- [2] *Exvalos - Určení velikosti ložiska* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.exvalos.cz/soubory/File/Hlavni_katalog_SKF/6000_CS_00_03_Urceni%20velikosti%20loziska.pdf
- [3] *ZKL GROUP - Mazání ložisek* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/9-mazani-lozisek>
- [4] HELEBRANT, František a Jiří ZIEGLER. *Technická diagnostika a spolehlivost*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0650-9.
- [5] *PROVOZ, DIAGNOSTIKA A ÚDRŽBA STROJŮ* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.340.vsb.cz/doc/cms_library/provoz-diagnostika-a-udrzba-stroju-189.pdf
- [6] BILOŠ, Jan a Alena BILOŠOVÁ. *Aplikovaný mechanik jako součást týmů konstruktérů a vývojářů: studijní opora* [CD-ROM]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, 2012. ISBN 978-80-248-2755-1.
- [7] *Adash - Diagnostika stavu valivých ložisek* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://adash.com/doc/ApplicationNotes/diag_val_lozisek_info_cz.pdf
- [8] *Adash - Diagnostika valivých ložisek* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://adash.com/doc/ApplicationNotes/diag_val_lozisek_man_cz.pdf
- [9] *Veskom - Diagnostika ložisek* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.veskom.cz/cz/diagnostika-lozisek>

- [10] *SKF - Vibrační analyzátory* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/condition-monitoring/portables-data-collectors-and-analyzers/vibration-analyzers/index.html?switch=y>
- [11] *Siemens - Siemens otevřel studentskou kancelář pro konstruktéry* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: http://www.siemens.cz/press/cz/nove/press_releases-siemens_otevrel_studentskou_kancelar_pro.html
- [12] *Přenosné přístroje pro diagnostiku stavu strojů. SPM Instrument* [online]. [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: <http://www.spminstrument.cz/produkty-sluzby/prenosne-pristroje-pro-diagnostiku-stroju/>
- [13] *SKF - klece* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/roller-bearings/principles/bearing-data-general/cages/index.html>
- [14] *SKF - mazání* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/bearings-units-housings/roller-bearings/principles/lubrication/index.html>
- [15] *SPM Spektrum* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://www.spminstrument.cz/pdf/spm_spectrum.pdf
- [16] *Kluzná ložiska* [online]. [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: http://www.strojka.opava.cz/UserFiles/File/_sablon/SPS_II/VY_32_INOVACE_C-07-16.pdf

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Obrázek 1 Kuličkové ložisko [1]	14
Obrázek 2 Použití plastického maziva [3]	17
Obrázek 3 Příklad harmonického kmitání [4]	19
Obrázek 4 Snímač rychlosti [6]	23
Obrázek 5 Snímač zrychlení – tlakový typ [6]	25
Obrázek 6 Možnosti umístění snímačů [5]	27
Obrázek 7 Vývoj poruchy ložiska [8]	28
Obrázek 8 Příklad poškození ložiska – poškození kroužků ložiska [7]	29
Obrázek 9 Vznik vibračního signálu [7]	29
Obrázek 10 Vibrační signál poškozeného ložiska [7]	30
Obrázek 11 Trendování měřených vibrací [4]	30
Obrázek 12 Poruchová frekvence valivého ložiska [4]	31
Obrázek 13 Příklad modulovaného signálu [8]	32
Obrázek 14 Příklad FFT spektra [8]	33
Obrázek 15 Příklad metody SPM s vyjádřením hodnot dBm a dBc [9]	34
Obrázek 16 Časový průběh Crest Faktoru [8]	35
Obrázek 17 Graf závažnosti poruch pomocí metody HF [8]	36
Obrázek 18 Logo společnosti Siemens s.r.o. [11]	38
Obrázek 19 Řízení výrovy sladu v Plzeňském Prazdroji [11]	39
Obrázek 20 Použité měřicí přístroje	41
Obrázek 21 Záznam z měření	42
Obrázek 22 Poškození vnitřního kroužku	47
Obrázek 23 Poškození vnějšího kroužku	48
Obrázek 24 Poškození ložiska vlivem nečistot v mazivu	49
Obrázek 25 Poškození kuličky ložiska	51
Obrázek 26 Neúmyslné poškození vnějšího kroužku ložiska	51
Obrázek 27 Poškození ložiska z provozu	52
Graf 1 Fázové porovnání rychlosti, zrychlení a výchylky [5]	22
Graf 2 Hodnocení vibrací podle SPM dBm/dBc	46
Tabulka 1 Parametry elektromotoru	43
Tabulka 2 Chybové frekvence měřeného ložiska	43
Tabulka 3 Naměřené efektivní hodnoty	45
Tabulka 4 Mezní hodnoty maximální velikosti vibrací v efektivních hodnotách	45
Tabulka 5 Naměřené hodnoty dBm/dBc	46

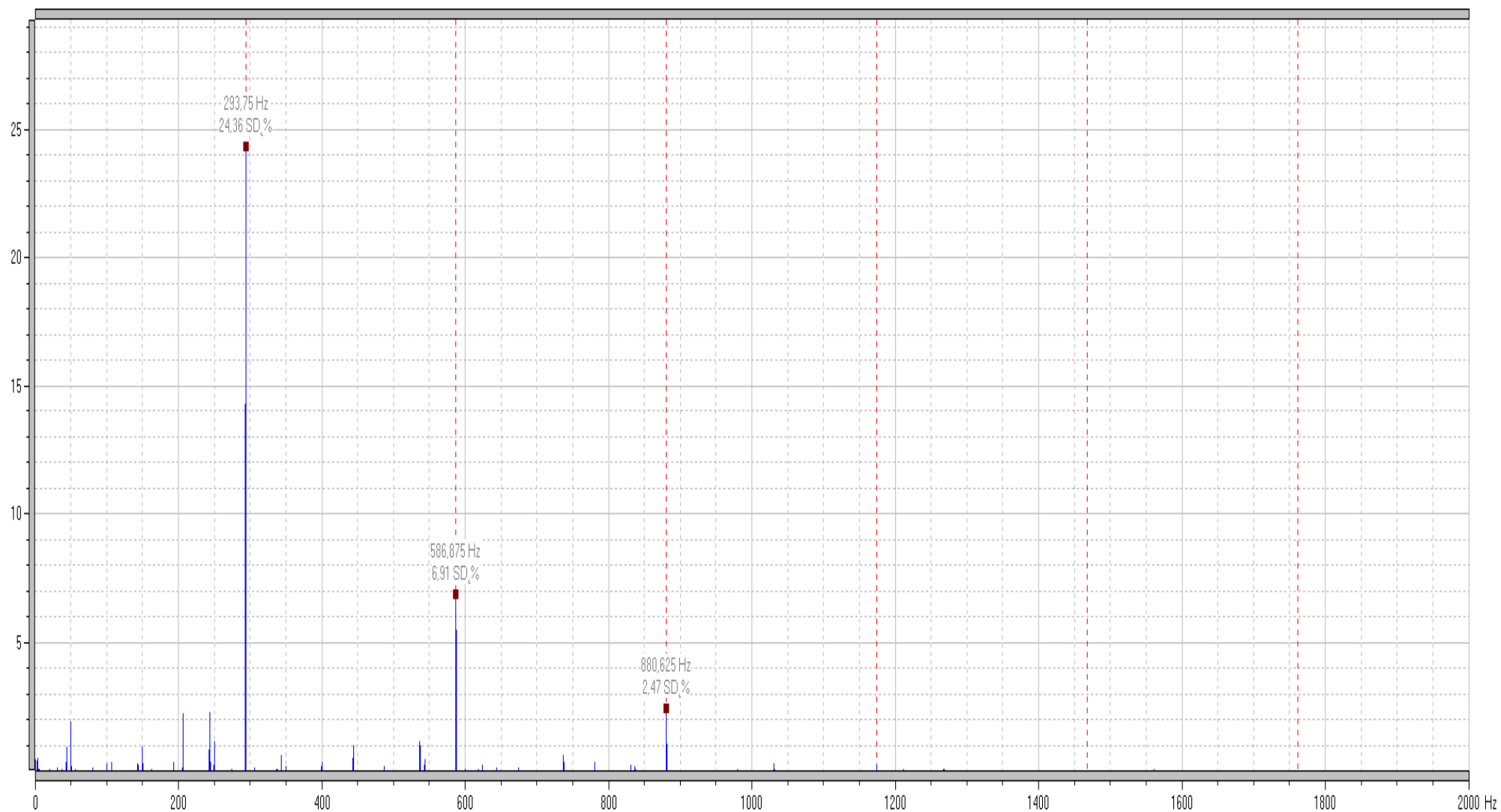
SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A	Záznam z měření ložiska s poškozením vnitřního kroužku pomocí metody rázových pulzů SPM
Příloha B	Záznam z měření ložiska s poškozením vnitřního kroužku pomocí frekvenčního spektra zrychlení
Příloha C	Záznam z měření ložiska s poškozením vnitřního kroužku pomocí obálky zrychlení
Příloha D	Záznam z měření ložiska s poškozením vnějšího kroužku pomocí metody rázových pulzů SPM
Příloha E	Záznam z měření ložiska s poškozením vnějšího kroužku pomocí frekvenčního spektra zrychlení
Příloha F	Záznam z měření ložiska s poškozením vnějšího kroužku pomocí obálky zrychlení
Příloha G	Záznam z měření ložiska s poškozením vlivem nečistot v mazivu pomocí metody rázových pulzů SPM
Příloha H	Záznam z měření ložiska s poškozením vlivem nečistot v mazivu pomocí frekvenčního spektra zrychlení
Příloha I	Záznam z měření ložiska s poškozením vlivem nečistot v mazivu pomocí obálky zrychlení
Příloha J	Záznam z měření nového ložiska pomocí metody rázových pulzů SPM
Příloha K	Záznam z měření nového ložiska pomocí frekvenčního spektra zrychlení
Příloha L	Záznam z měření nového ložiska pomocí obálky zrychlení
Příloha M	Záznam z měření ložiska s poškozením kuličky pomocí metody rázových pulzů SPM
Příloha N	Záznam z měření ložiska s poškozením kuličky pomocí frekvenčního spektra zrychlení
Příloha O	Záznam z měření ložiska s poškozením kuličky pomocí obálky zrychlení
Příloha P	Záznam z měření ložiska s přirozeným poškozením pomocí metody rázových pulzů SPM

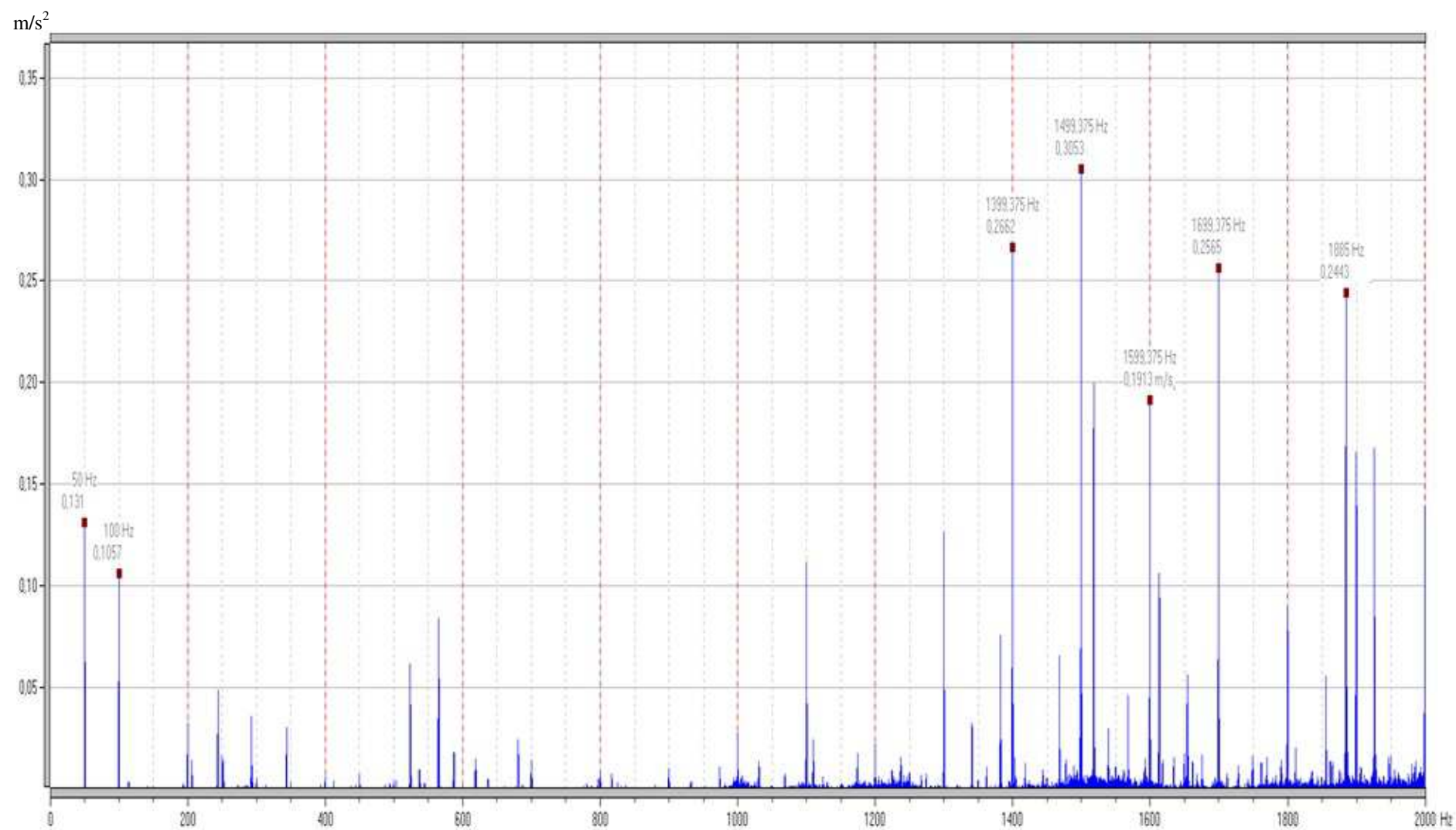
Příloha Q Záznam z měření ložiska s přirozeným poškozením pomocí frekvenčního spektra zrychlení

Příloha R Záznam z měření ložiska s přirozeným poškozením pomocí obálky zrychlení

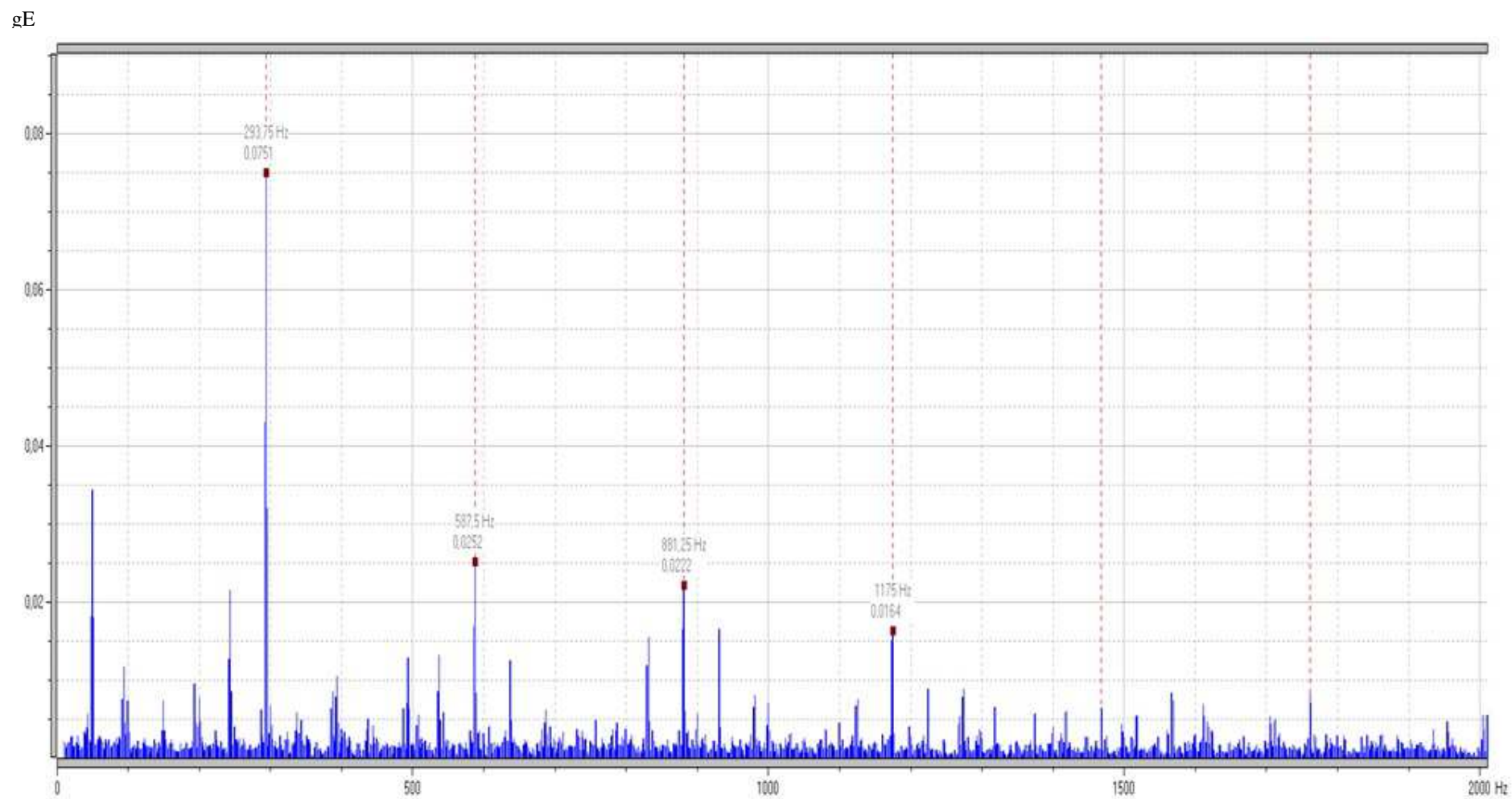
Příloha A Záznam z měření ložiska s poškozením vnitřního kroužku pomocí metody rázových pulzů SPM



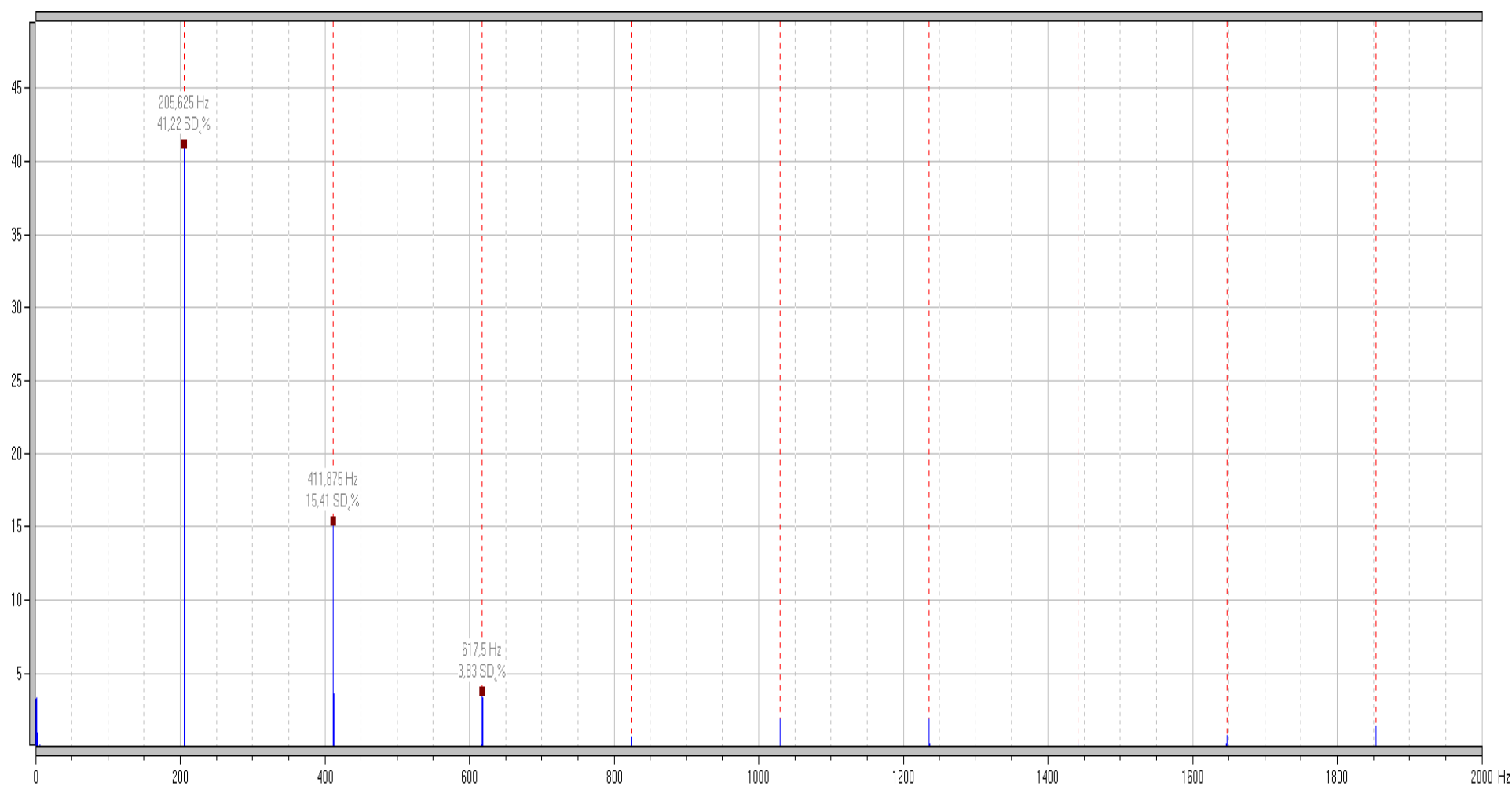
Příloha B Záznam z měření ložiska s poškozením vnitřního kroužku pomocí frekvenčního spektra zrychlení



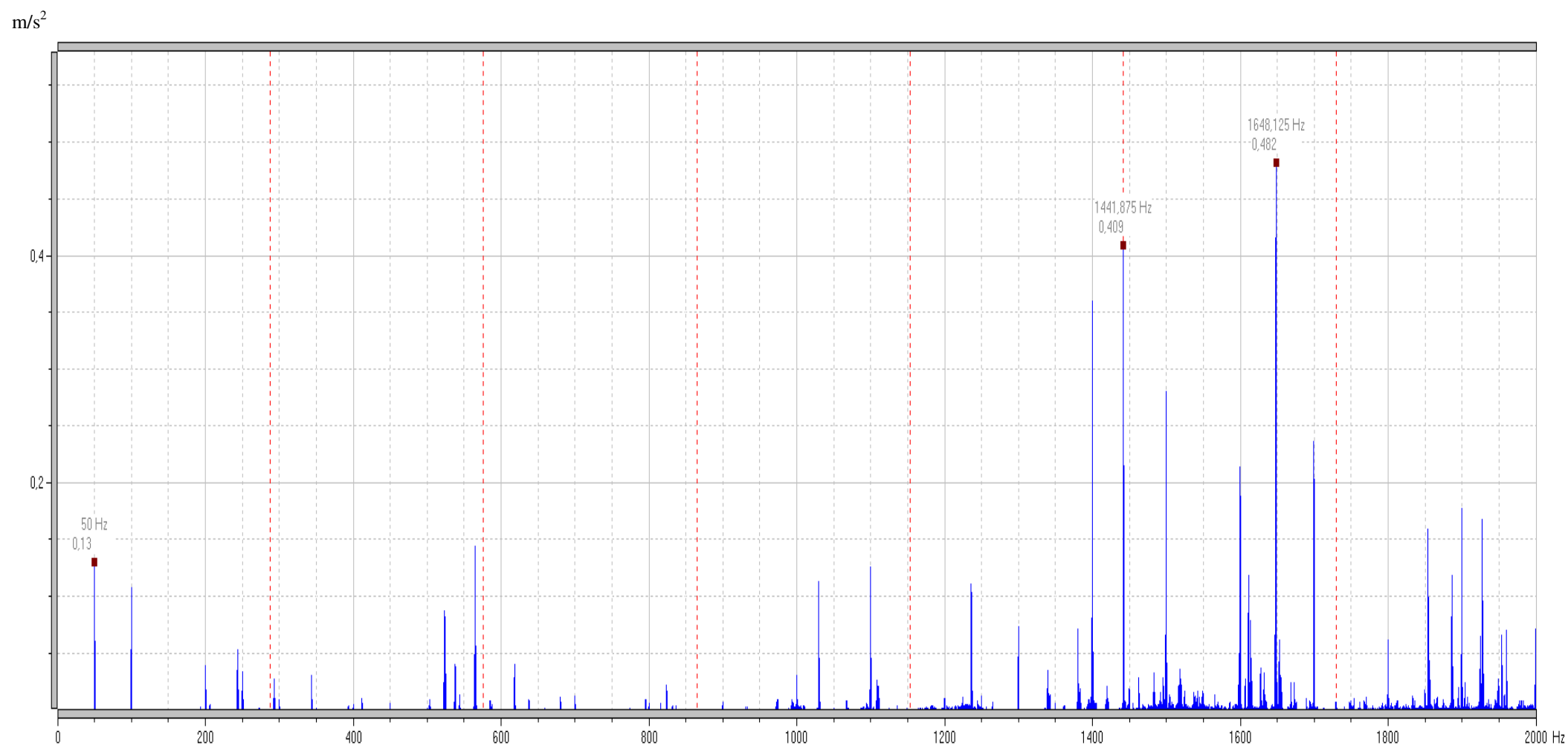
Příloha C Záznam z měření ložiska s poškozením vnitřního kroužku pomocí obálky zrychlení

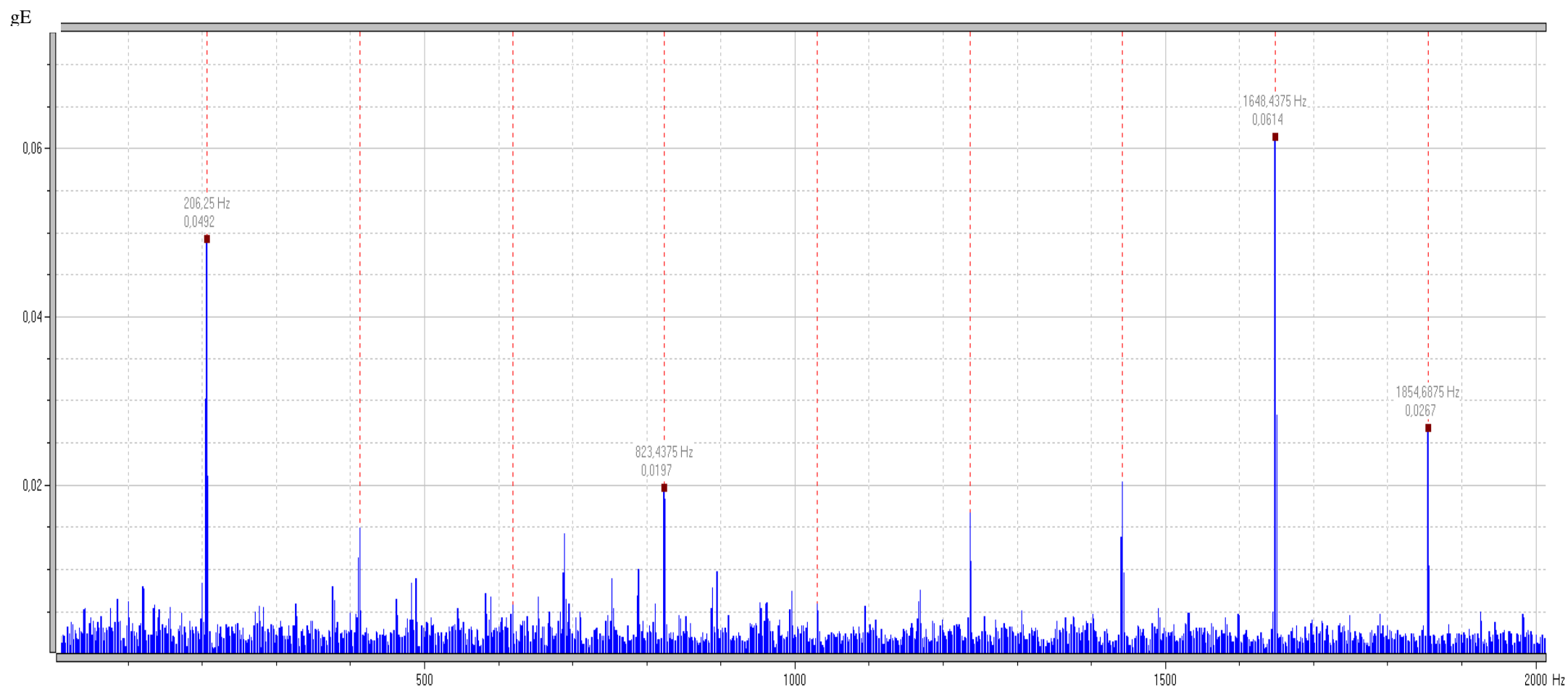


Příloha D Záznam z měření ložiska s poškozením vnějšího kroužku pomocí metody rázových pulzů SPM

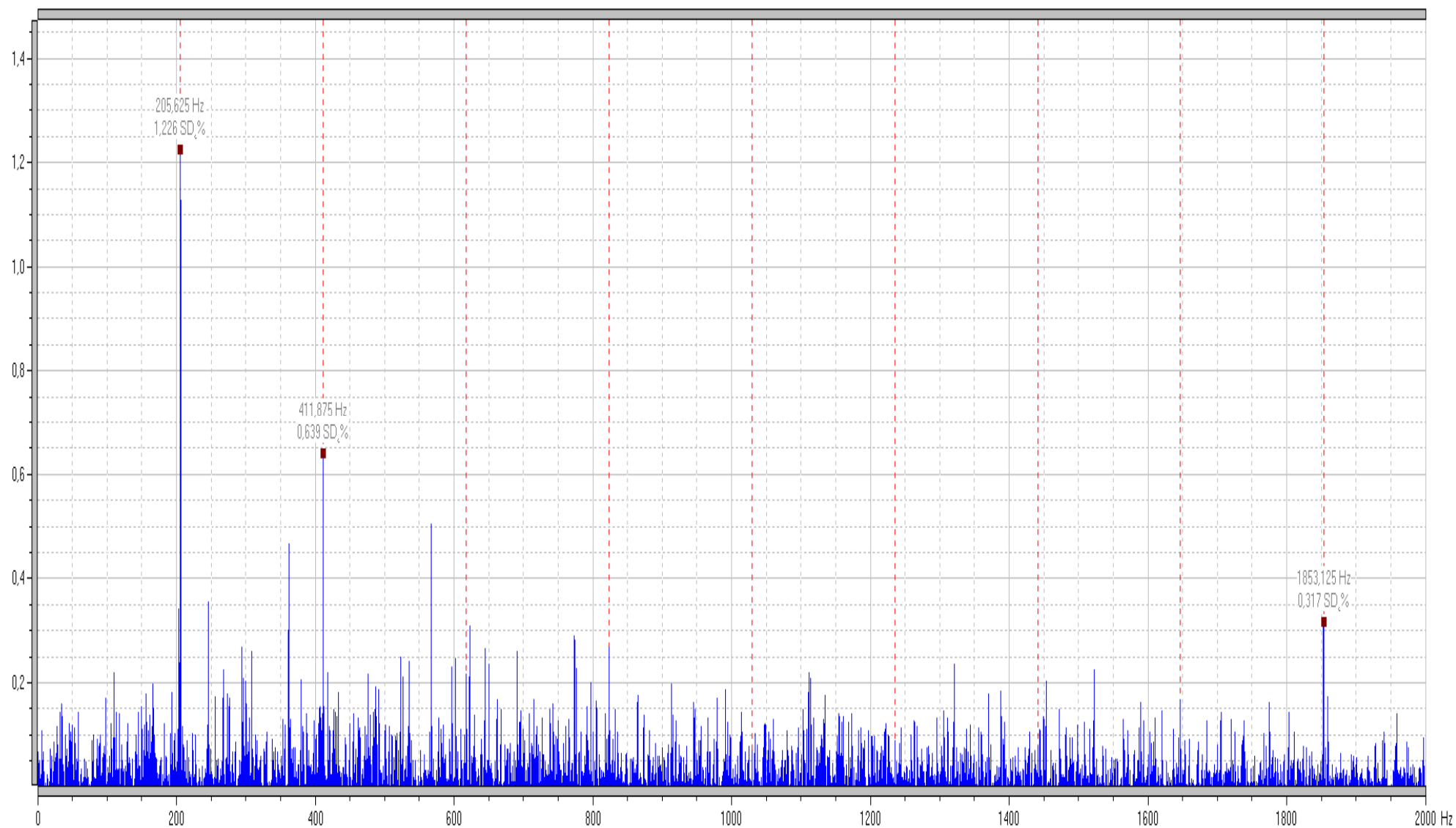


Příloha E Záznam z měření ložiska s poškozením vnějšího kroužku pomocí frekvenčního spektra zrychlení

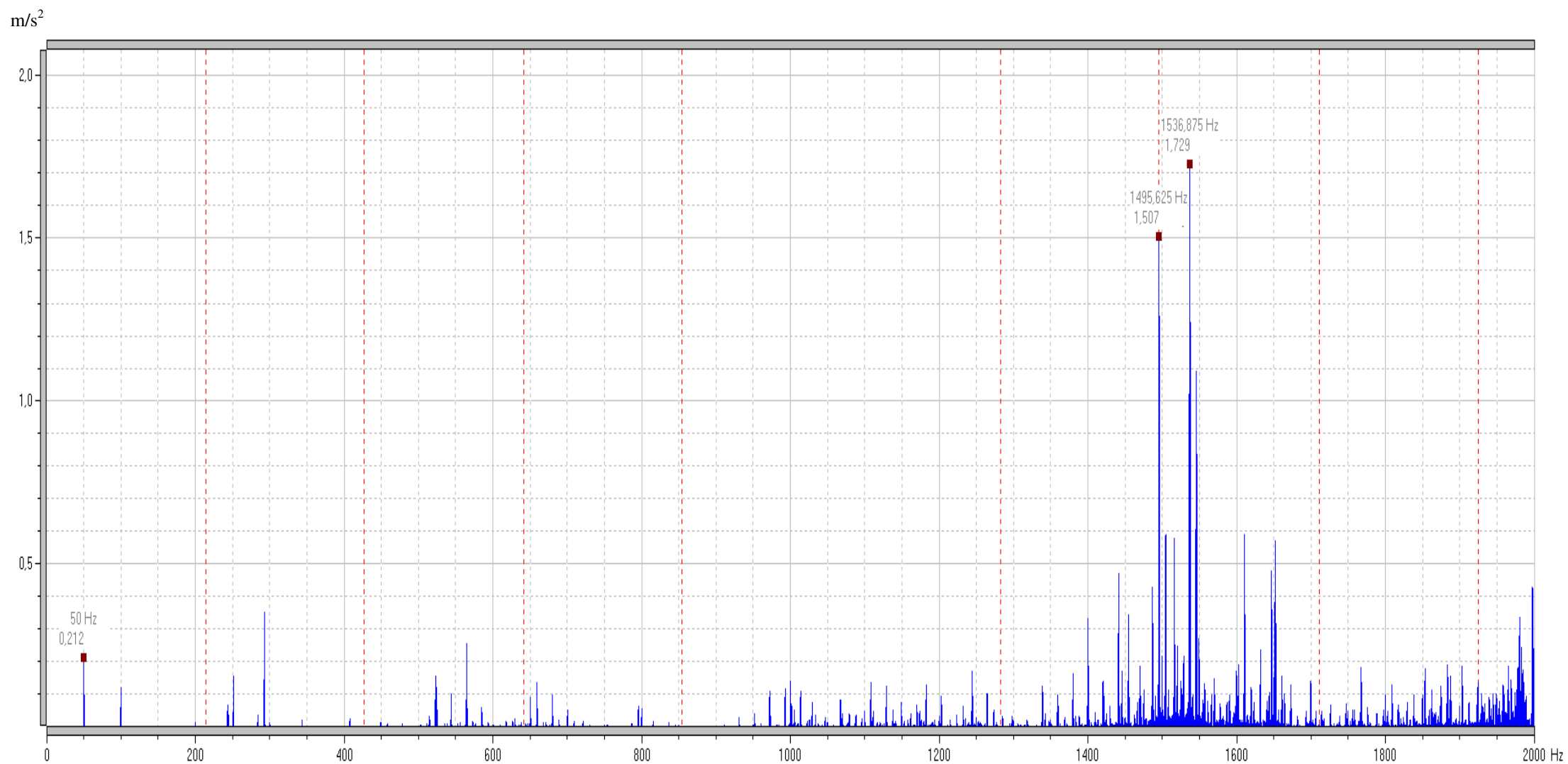




Příloha G Záznam z měření ložiska s poškozením vlivem nečistot v mazivu pomocí metody rázových pulzů SPM

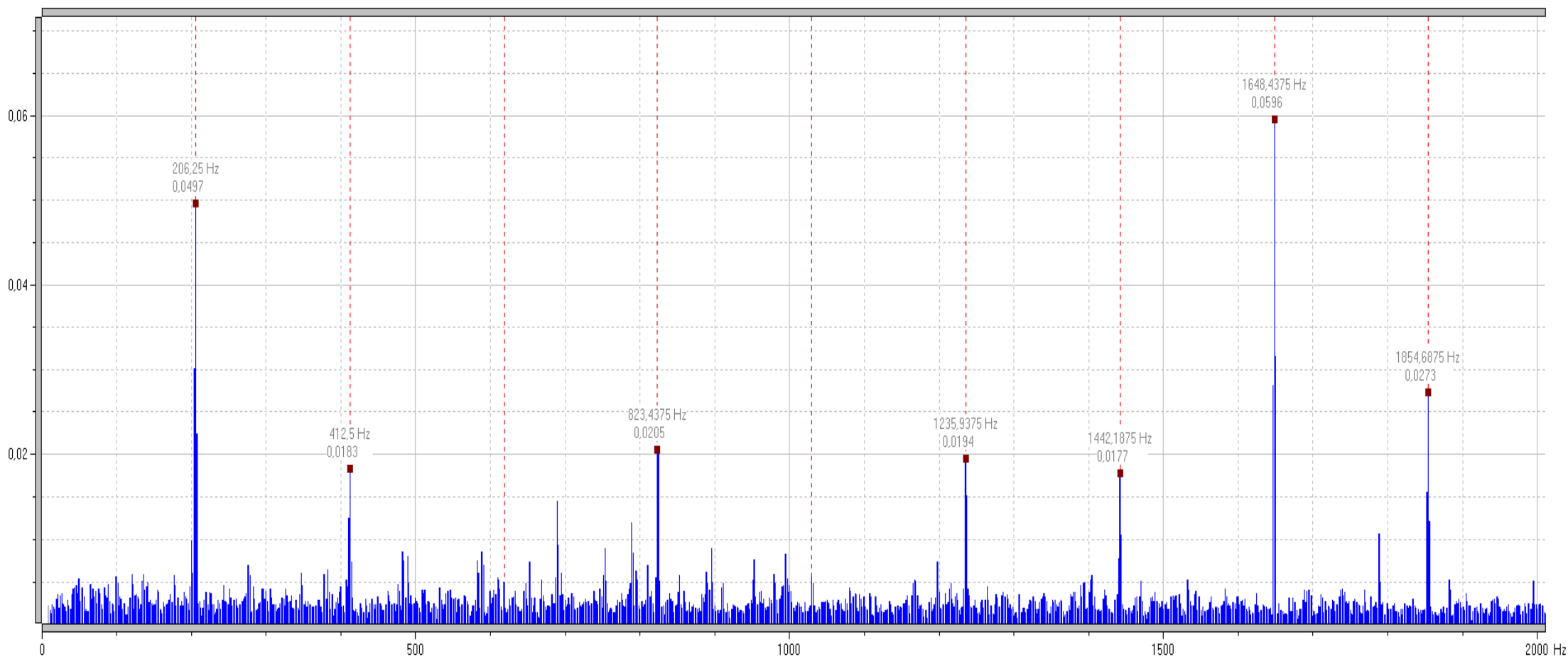


Příloha H Záznam z měření ložiska s poškozením vlivem nečistot v mazivu pomocí frekvenčního spektra zrychlení

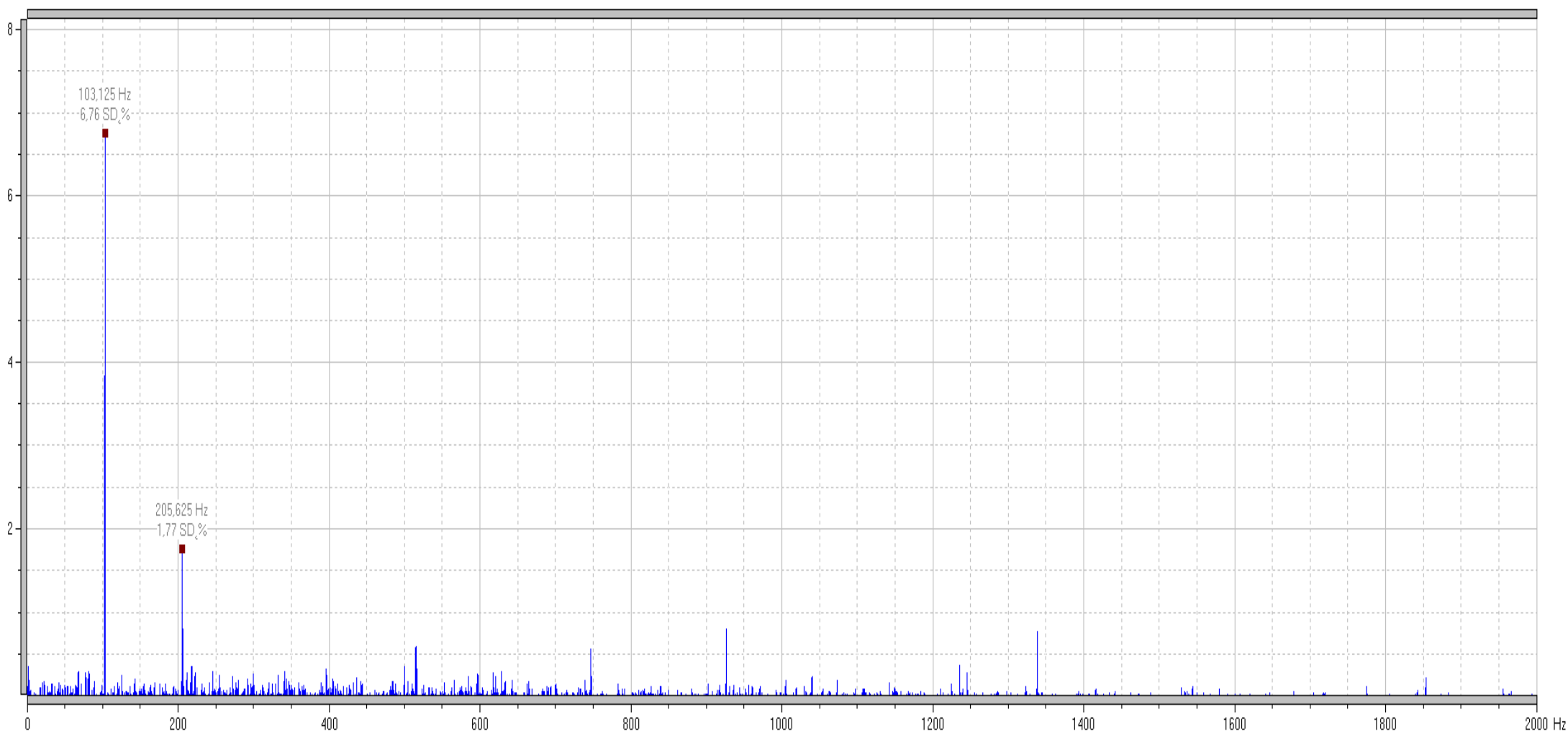


Příloha I Záznam z měření ložiska s poškozením vlivem nečistot v mazivu pomocí obálky zrychlení

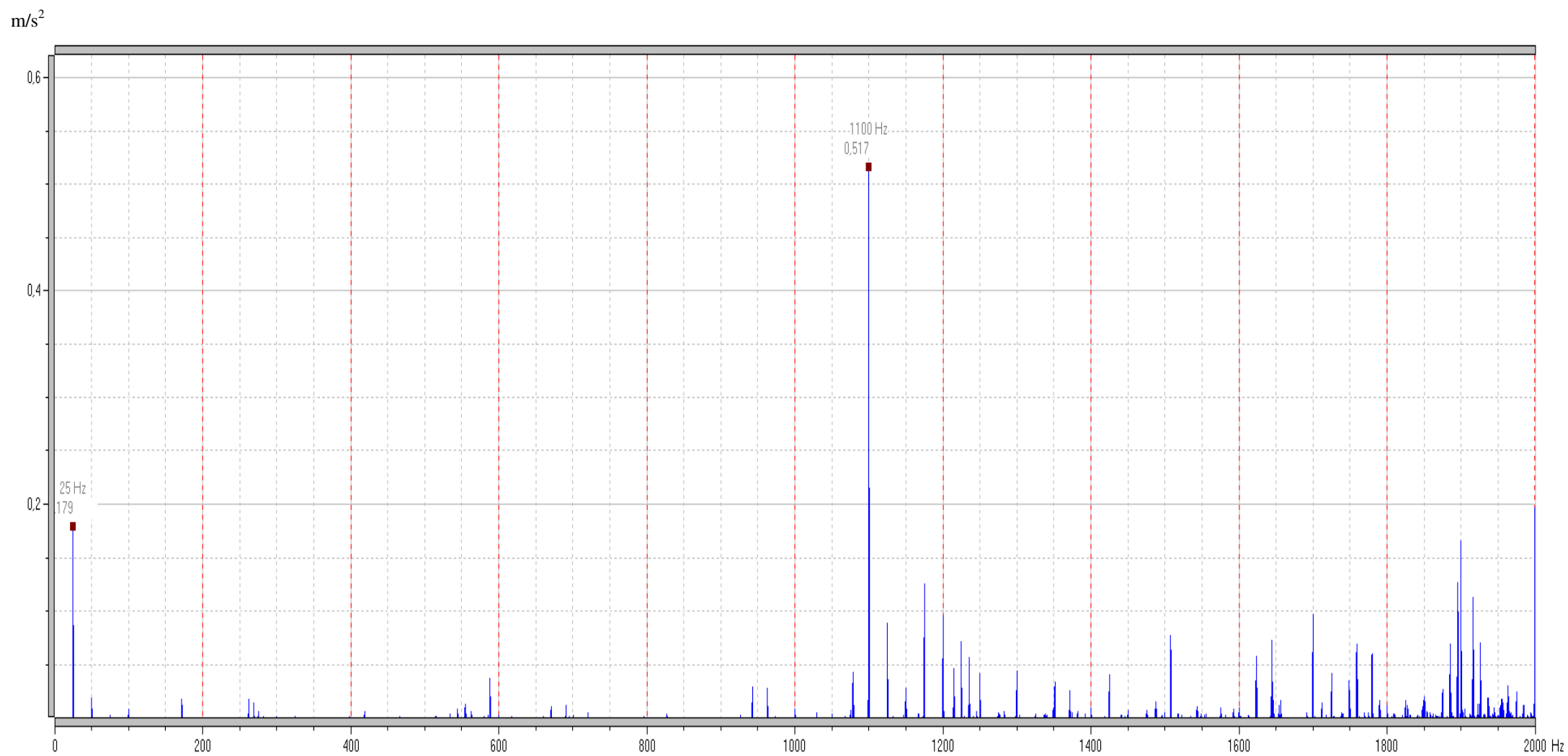
gE

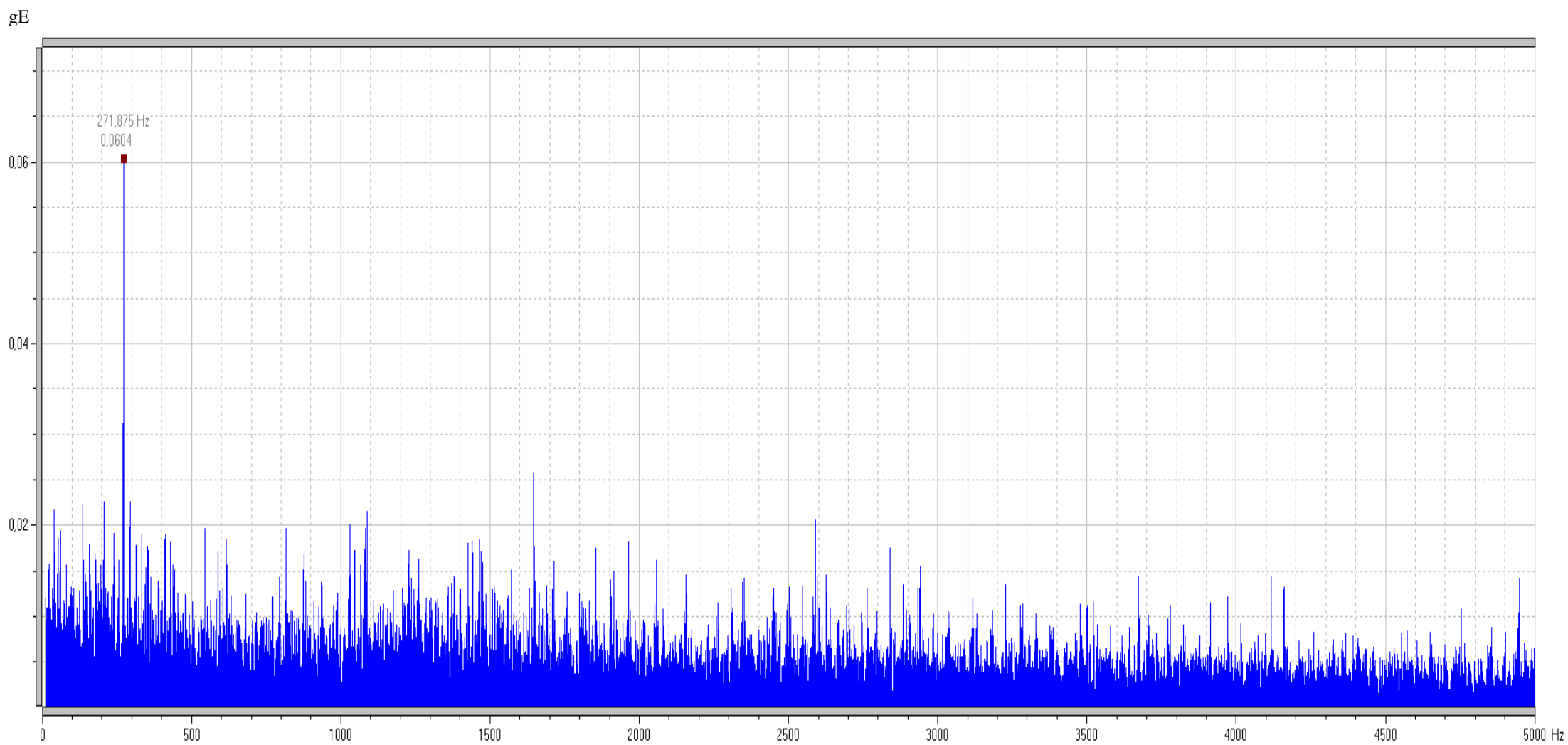


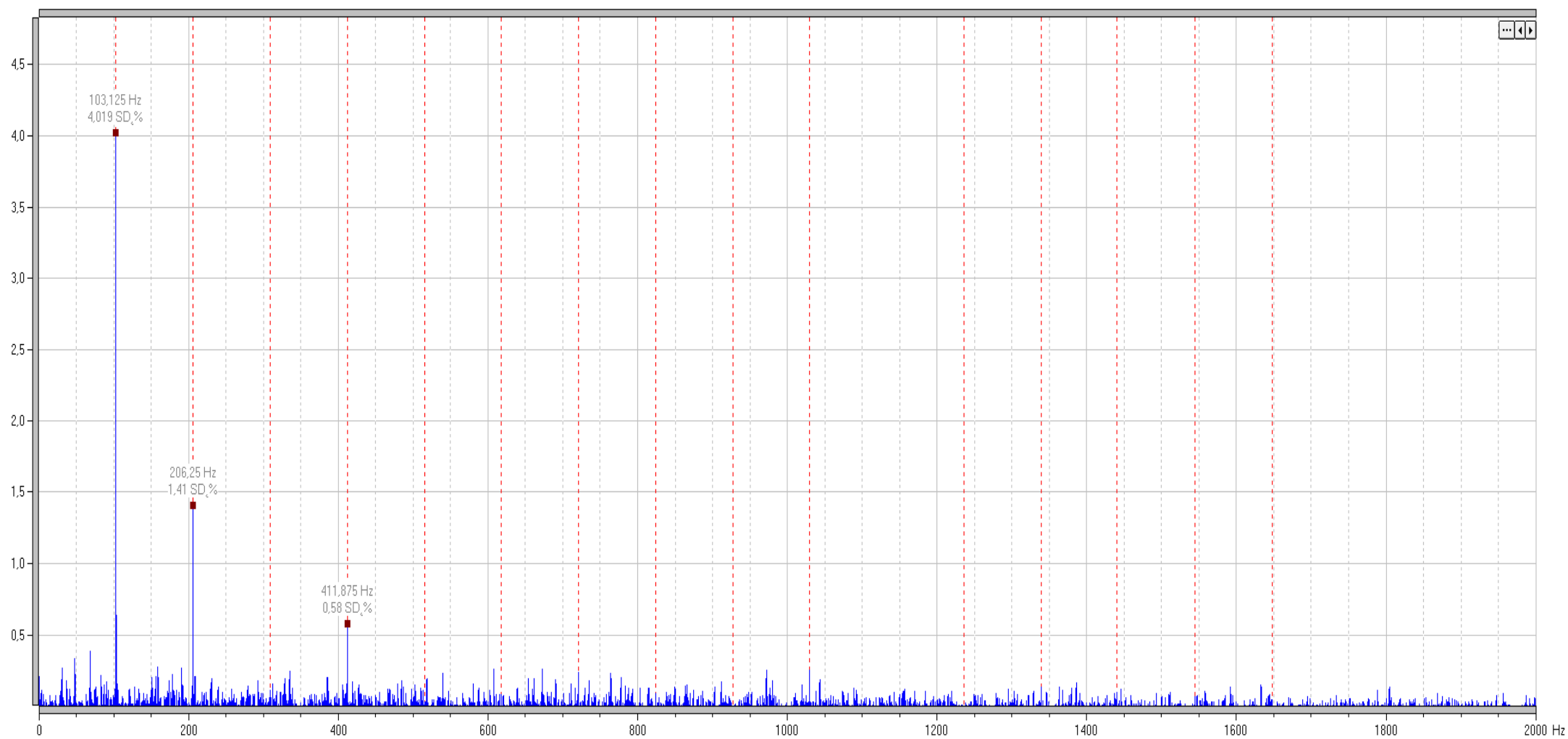
Příloha J Záznam z měření nového ložiska pomocí metody SPM



Příloha K Záznam z měření nového ložiska pomocí frekvenčního spektra zrychlení

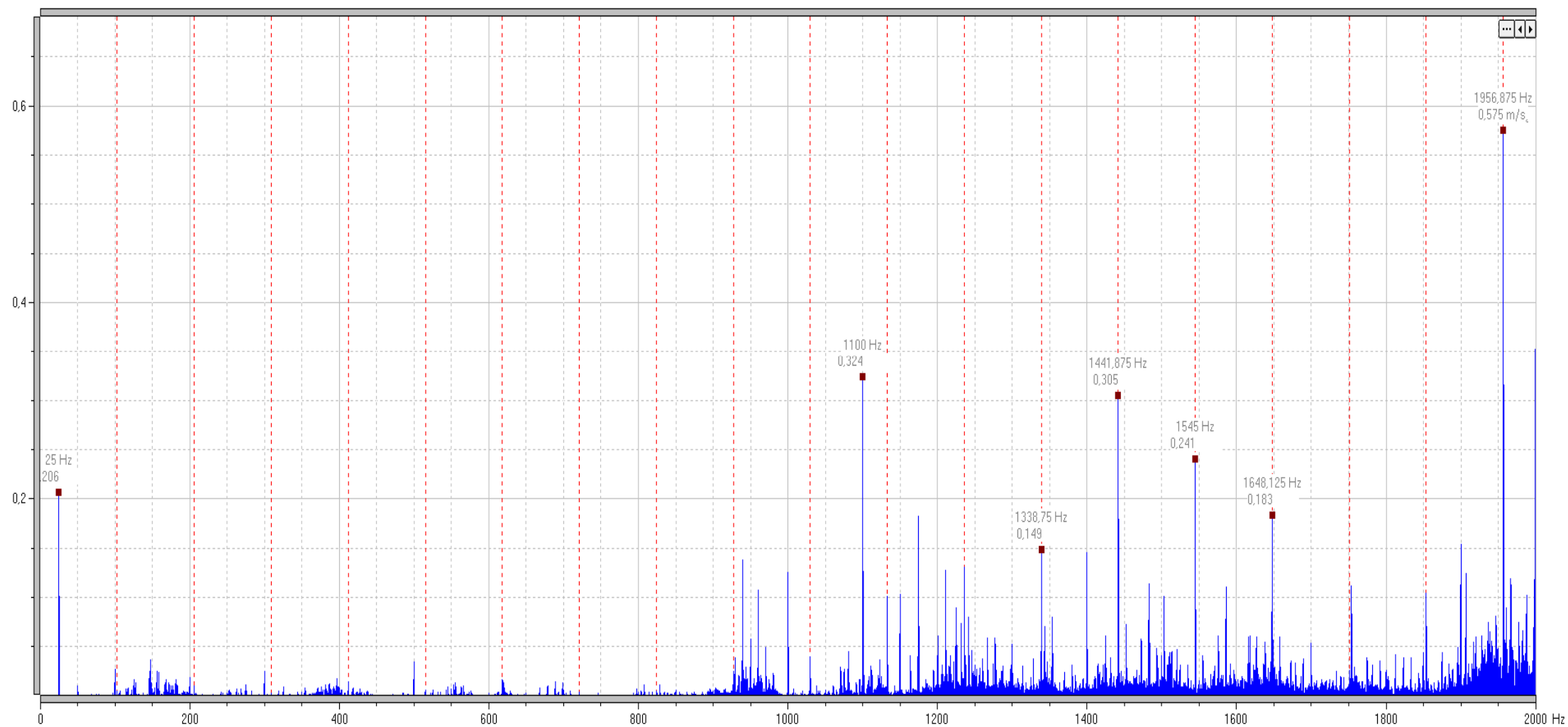




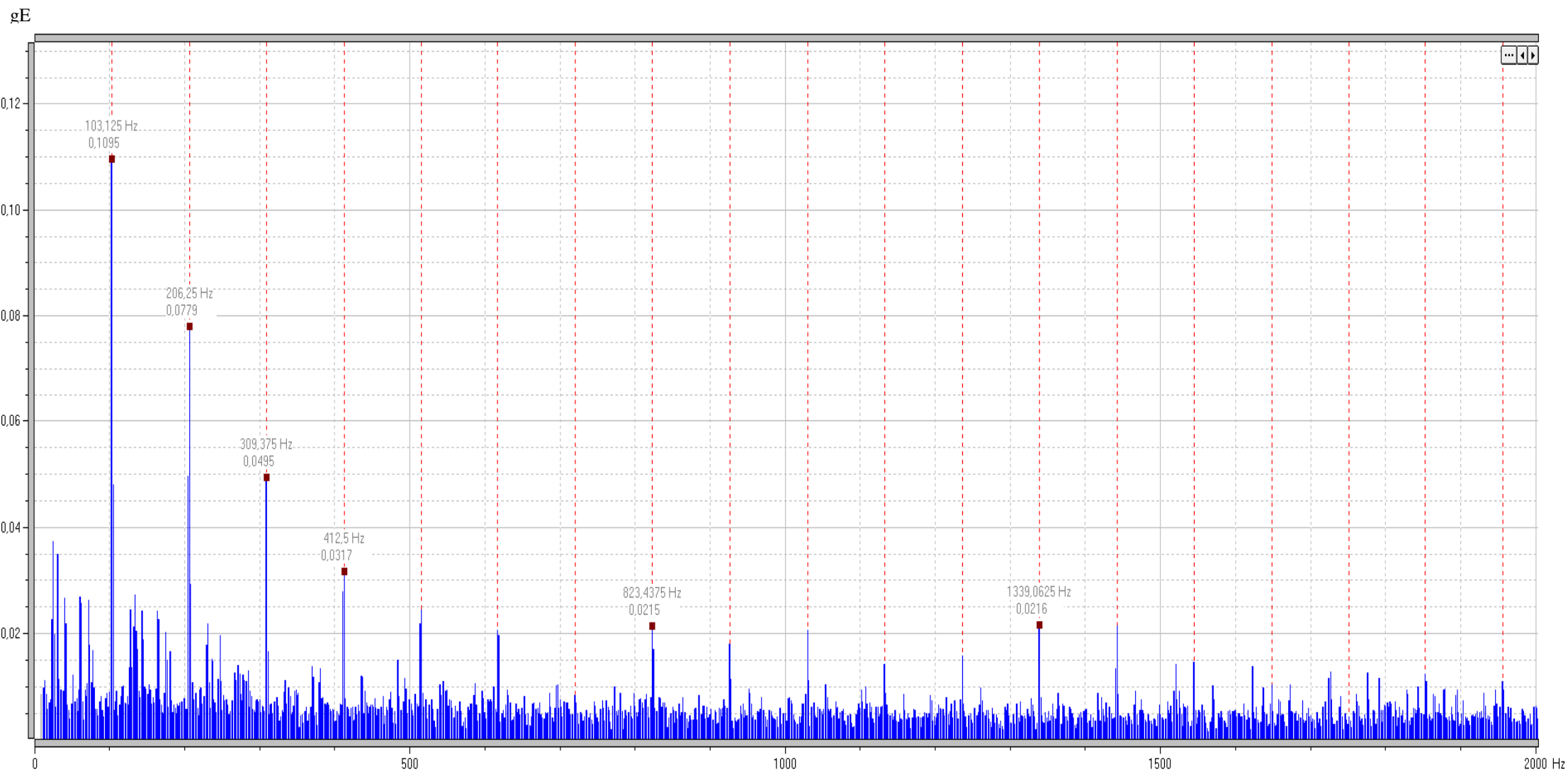


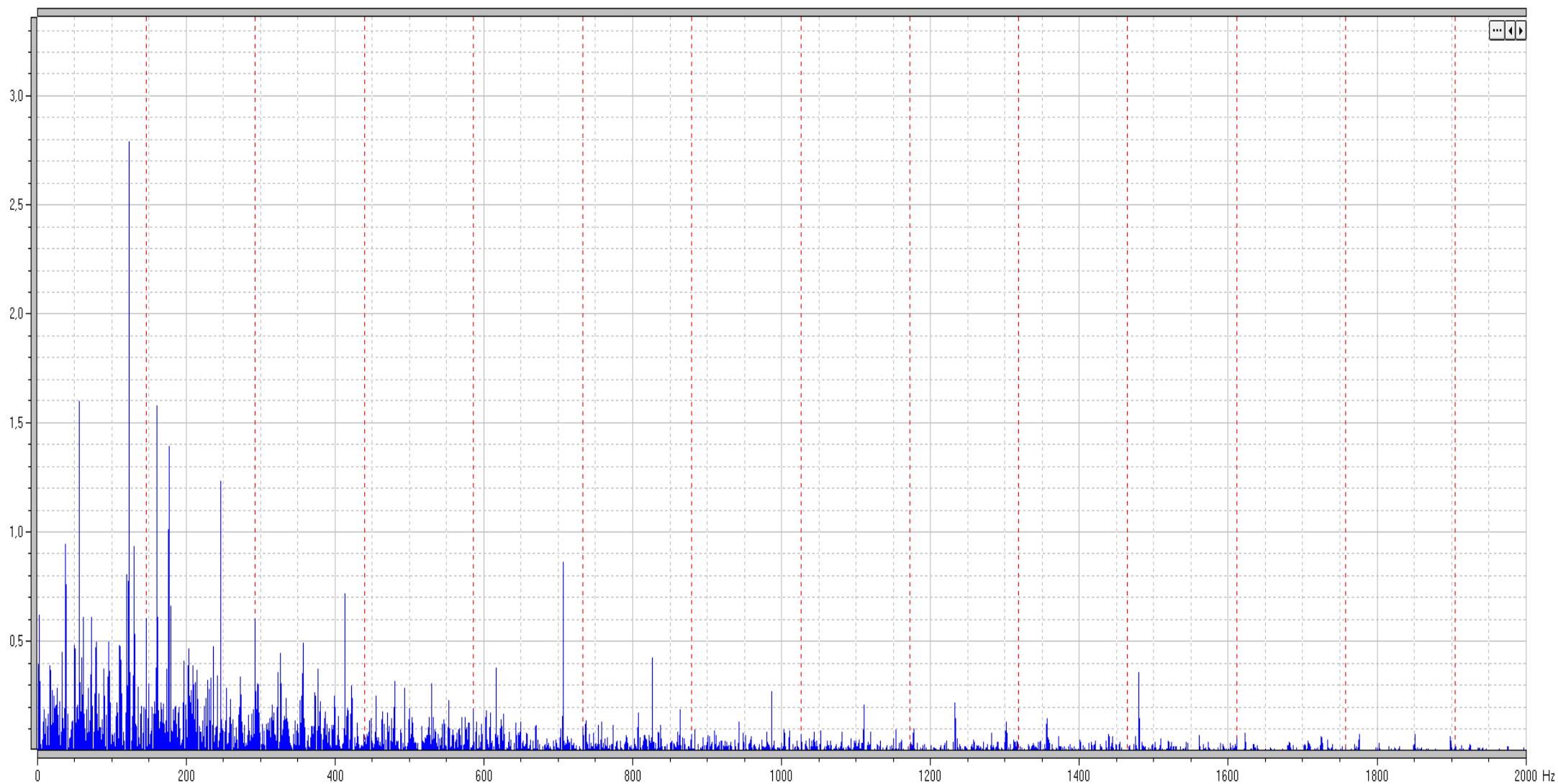
Příloha N Záznam z měření ložiska s poškozením kuličky pomocí frekvenčního spektra zrychlení

m/s²

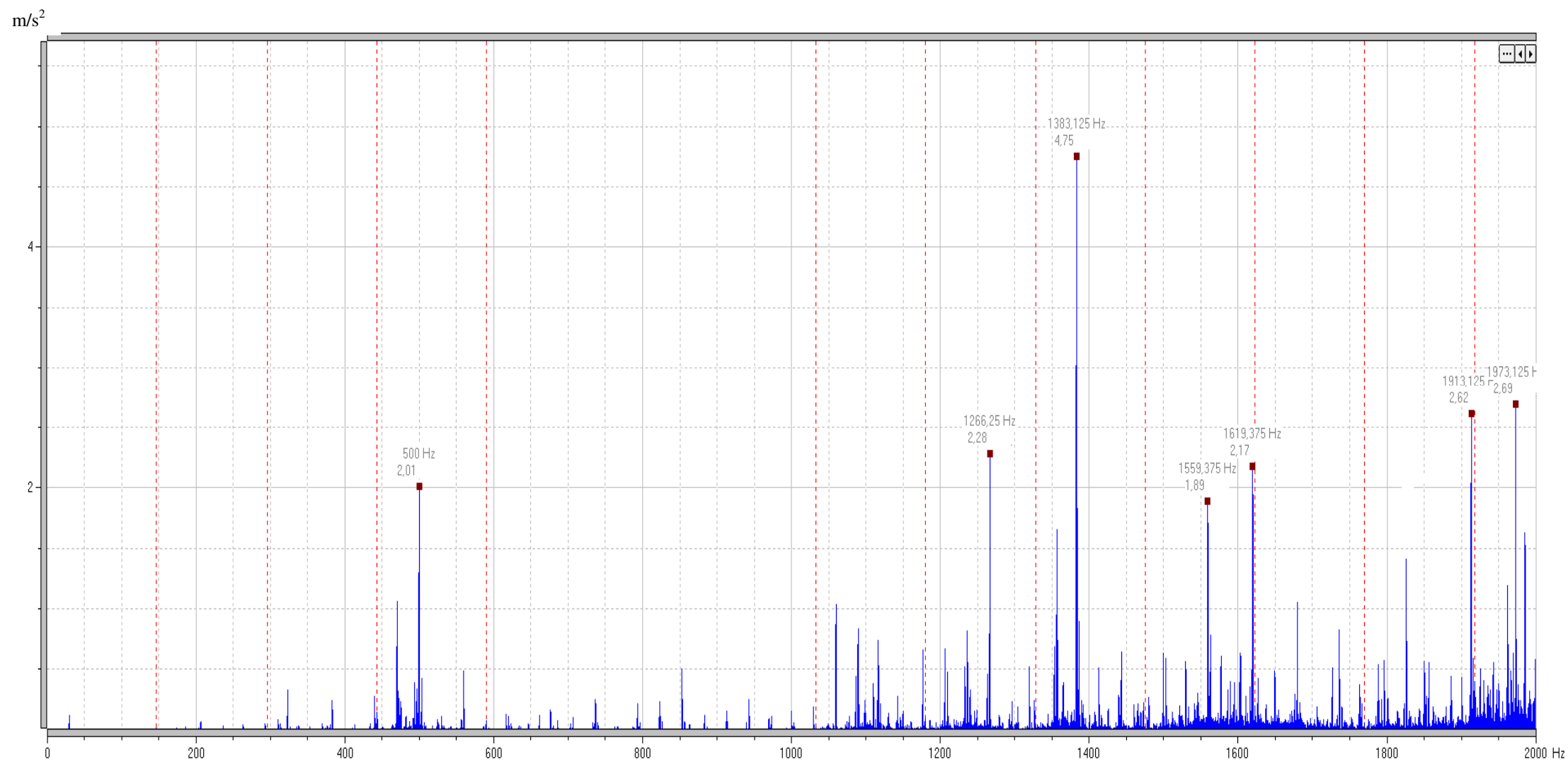


Příloha O Záznam z měření ložiska s poškozením kuličky pomocí obálky zrychlení





Příloha Q Záznam z měření ložiska s přirozeným poškozením pomocí frekvenčního spektra zrychlení



Příloha R Záznam z měření ložiska s přirozeným poškozením pomocí obálky zrychlení

gE

